

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy

**Návrh pracoviště pro měření magnetických polí**

**Design of workplace for magnetic measurement**

**Bakalářská práce**

Autor:	<b>Petr Schovanec</b>
Vedoucí práce:	Ing. Lubomír Slavík

**V Liberci 1. 5. 2011**

# Zadání

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce.

Datum

Podpis

## **Poděkování**

Touto cestou bych chtěl poděkovat především vedoucímu bakalářské práce Ing. Lubomíru Slavíkovi za odborné vedení, trpělivost a pomoc při zpracování této bakalářské práce.

Samozřejmě mé poděkování patří také celé mé rodině za všestrannou podporu při mém vysokoškolském studiu.

## Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je návrh praktických cvičení předmětu Měřicí technika I se zaměřením na měření magnetických polí, zejména pak měření hysterezní smyčky. V úvodní kapitole je rozebrána teorie magnetické pole včetně magnetických materiálů se zaměřením na feromagnetické látky. Dále pak se práce zabývá hysterezními smyčkami a jejich zobrazením.

Kvůli automatizaci měření je v další kapitole popsána sběrnice GPIB a sériová komunikace přístrojů, kdy prostřednictvím přístrojového jazyka SCPI měřicí přístroje komunikují s počítačovým programem MATLAB.

Praktická část dokumentu se týká vlastního návrhu měřicího přípravku, tedy návrhu schématu a motivu plošného spoje včetně osazení a v závěrečné části je popsáno zautomatizování celého měření pomocí programu MATLAB.

**Klíčová slova:** feromagnetika, hysterezní křivka, prvotní magnetování, GPIB komunikace, přístrojový jazyk SCPI, MATLAB

## Abstract

The aim of this Bachelor thesis is to design practical training of the course Measuring technique I with specialization on measurements of magnetic fields (eg. hysteresis loop measurement). The introductory chapter discusses the theory of magnetic field, including magnetic materials with a focus on ferromagnetic substances. Furthermore, the work deals with hysteresis loops and it's views.

Due to automatization of measurement, GPIB bus and serial communication devices are described in the next chapter. Via these, SCPI instrument language measuring devices communicate with the computer program MATLAB.

The practical part of the document contains a design of a product, a design scheme and PCB layout, including installation. The final section describes how to automate the entire measurement using MATLAB.

**Key words:** ferromagnetics, hysteresis curve, primary magnetization, GPIB communication, instrument SCPI language, software MATLAB

# Obsah

Prohlášení.....	3
Poděkování.....	4
Abstrakt.....	5
Obsah .....	6
Seznam obrázků .....	8
Seznam tabulek .....	9
Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	10
Úvod.....	11
1 Magnetické pole .....	13
1.1 Teoretický úvod .....	13
1.2 Magnetické veličiny .....	14
1.2.1 Hopkinsonův zákon.....	15
1.3 Reakce materiálu na působení magnetického pole .....	17
1.4 Feromagnetické materiály a jejich vlastnosti.....	18
1.5 Hodnocení vlastností magnetických materiálů .....	19
1.6 Magnetizační panenská křivka.....	20
1.7 Hysterezní křivka .....	20
1.8 Demagnetizační křivka .....	22
1.9 Ztráty v magnetickém obvodu.....	23
1.10 Vzduchová mezera magnetického obvodu .....	24
2 Komunikační počítačové prostředky .....	25
2.1 Prostředí MATLAB .....	25
2.1.1 Struktura programu .....	26
2.1.2 Instrumental Control Toolbox.....	26

2.1.3	Instrumental Control Toolbox library .....	27
2.1.4	Simulink .....	27
2.2	GPIB sběrnice .....	28
2.2.1	Standart IEEE 488.....	28
2.3	Sériová komunikace RS232 .....	29
2.4	Přístrojový jazyk SCPI.....	30
3	Návrh měření magnetických polí .....	32
3.1	Měření statické hysterezní smyčky .....	32
3.2	Měření dynamické hysterezní smyčky.....	32
3.2.1	Metoda měření .....	33
3.2.2	Navržený přípravek .....	34
4	Realizace přípravku.....	36
4.1	Deska plošných spojů.....	36
4.2	Zapojení se zesilovačem .....	37
5	Zobrazení v počítačovém programu MATLAB.....	39
5.1	Automatizování měření.....	39
5.2	Porovnání teslametrů.....	41
6	Závěr .....	44
	Seznam použité literatury .....	45
	Přílohy.....	46

## Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Náhradní schéma magnetického obvodu .....	16
Obrázek 1.2: Uspořádání magnetických momentů různých materiálů.....	18
Obrázek 1.3: Hysterezní křivka s prvotní magnetizací.....	21
Obrázek 1.4: Hysterezní smyčky .....	22
Obrázek 1.5: Navinutá cívka na feritovém jádře .....	24
Obrázek 1.6: Vliv vzduchové mezery na tvar magnetizační smyčky.....	24
Obrázek 2.1: Uspořádání sběrnice GPIB .....	29
Obrázek 2.2: Stromová struktura příkazů SCPI a příklad použití oddělovačů u složených příkazů .....	31
Obrázek 3.1: Blokové schéma zapojení.....	32
Obrázek 3.2: Jednoduchý integrační člen .....	34
Obrázek 3.3: Blokové schéma zapojení přípravku .....	35
Obrázek 3.4: Měřený magnetický obvod.....	35
Obrázek 4.1: Schéma přípravku pro měření statické hysterezní smyčky .....	36
Obrázek 4.2: Zapojení na DPS se součástkami .....	37
Obrázek 4.3: Schéma přípravku pro měření dynamické hysterezní smyčky se zesilovačem.....	37
Obrázek 4.4: Zapojení DPS se součástkami a zesilovačem.....	38
Obrázek 5.1: Část programu jazyka SCPI v MATLABu .....	39
Obrázek 5.2: Část programu jazyka SCPI v MATLABu, načtení okamžité hodnoty proudu .....	39
Obrázek 5.3: Ukázka části programu v MATLABu pro načtení 10ti hodnot.....	40
Obrázek 5.4: Ukázka blokového schéma v Simulinku .....	41
Obrázek 5.5: Zakoupené teslametry .....	42
Obrázek 5.6: 3D Hallova sonda.....	43



## Seznam tabulek

Tabulka 1.1: Analogické veličiny elektrických a magnetických obvodů .....	17
Tabulka C.1: Přípravek pro měření statické hysterezní smyčky .....	49
Tabulka C.2: Přípravek pro měření dynamické hysterezní smyčky se zesilovačem TDA 7294 .....	49
Tabulka D: Porovnání magnetických přístrojů .....	50

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

$E$	Intenzita elektrického pole
$H$	Intenzita magnetického pole
$D$	Elektrická indukce
$B$	Magnetická indukce
$\rho$	Hustota volného náboje
$j$	Hustota elektrického proudu
$\Phi$	Magnetický tok
$H$	Intenzita magnetického pole
$B$	Magnetická indukce
$H_c$	Zbytková koercitivita
$B_r$	Zbytková remanence
$B_m$	Maximální magnetická indukce
$\mu$	Permeabilita neboli prostupnost prostředí
$\mu_0$	Permeabilita neboli prostupnost vakua
$\mu_r$	Relativní (poměrná) permeabilita neboli prostupnost prostředí
$P$	Celkové ztráty
$P_h$	Hysterezní ztráty
$P_e$	Ztráty vířivými proudy
$P_r$	Zbytkové ztráty
$p$	Měrné ztráty
$m$	Metr

## Úvod

Přítomnost magnetického pole se projevuje tzv. magnetickými jevy a účinky. Pro laického pozorovatele jsou patrné zejména jeho silové účinky na okolní tzv. feromagnetické látky především v blízkosti tzv. pólů zdroje magnetického pole. Dohodou bylo stanoveno označení magnetických pólů [1].

1. „SEVERNÍ“ pól je mezinárodně označen písmenem „N“ (v české odborné literatuře často písmenem „S“) a na zdrojích magnetického pole (např. na permanentních magnetech) bývá označen barevným pruhem. Dohodou bylo stanoveno, že siločáry magnetického pole v místě severního pólu vystupují z tělesa zdroje magnetického pole.

2. „JIŽNÍ“ pól je mezinárodně označen písmenem „S“ (v české odborné literatuře často písmenem „J“) a na zdrojích magnetického pole (magnetech) bývá bez označení. Dohodou bylo stanoveno, že siločáry magnetického pole v místě jižního pólu vstupují (vracejí se) do tělesa zdroje magnetického pole. Vnitřkem tělesa zdroje magnetického pole siločáry pokračují k severnímu pólu a tvoří uzavřené křivky (pole vírové), čímž se mj. liší od siločar elektrického pole (pole zřídlové).

V praxi se také velmi často využívá poznatek, že nestejnojmenné póly dvou zdrojů magnetického pole se přitahují a stejnojmenné se odpuzují (fyzikální princip například tzv. „magnetického polštáře“, na kterém se pohybují vysokorychlostní dopravní prostředky). Uvádí se, že druhové označení magnetického pole vzniklo vžitým zobecněním názvu starořeckého města Magnésie, v jehož okolí se 500 let p.n.l. vyskytovala rozsáhlá povrchová ložiska vydatné přirozeně zmagnetované železné rudy  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (magnetovec).

Teorie, objasňující fyzikální podstatu magnetického pole, však mohla být vytvořena až na základě poznatků o jevech, souvisejících s průtokem elektrického proudu ve vodiči (IX. století) a teorie o struktuře hmoty (počátek XX. století). Elektrony, jež jsou nosičem elektrického náboje, při svém pohybu uvnitř atomů hmoty (spinová rotace a obíhání kolem jádra atomu) vytvářejí elementární magnetické momenty – podobně jako vzniká magnetické pole v okolí vodiče, kterým protéká elektrický proud, což je také uspořádaný pohyb volných nosičů elektrického náboje, vyvolaný silovým působením elektrického pole. Pokud jsou tyto elementární magnetické momenty jednotlivých elektronů v atomech orientovány zcela neuspořádaně („nahodile“), dochází k jejich vzájemnému vykompenzování a daná látka není zdrojem magnetického pole.

Čím více jednotlivých elementárních magnetických momentů elektronů je orientováno souhlasně, tím více je daná látka magnetická. Zmagnetování za „normálních“ podmínek nemagnetických látek vnějším magnetickým polem lze vysvětlit ovlivněním pohybu elektronů a tím i orientace jejich elementárních magnetických momentů silovým působením vnějšího magnetického pole. Přestane-li vnější magnetické pole působit, obnoví se (v ideálním případě) původní stav pohybu elektronů v atomech a tím i původní neuspořádaná („nahodilá“) orientace jejich elementárních magnetických momentů – daná látka bude opět nemagnetická.

Pokud se výchozí stav pohybu elektronů neobnoví zcela, zůstává původně nemagnetická látka více či méně zmagnetovaná i po odstranění vlivu vnějšího magnetického pole. Na stejném principu lze také vysvětlit zmenšení nebo úplné vymizení magnetického pole zmagnetované látky jejím ohřevem případně roztavením nebo působením ionizujícího záření.

# 1 Magnetické pole

## 1.1 Teoretický úvod

V roce 1865 zformuloval James Clerk Maxwell základní zákony v makroskopické teorii elektromagnetického pole. Maxwellovy rovnice lze zapsat, buď v integrálním a nebo v diferenciálním tvaru. V integrálním tvaru popisují elektromagnetické pole v jisté oblasti, a v diferenciálním tvaru v určitém bodu této oblasti.

**První Maxwellova rovnice** je zákon celkového proudu a zobecňuje Ampérův zákon. Integrální tvar rovnice:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I + \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (1.1)$$

*Ampérův zákon:* Víry magnetického pole vznikají tam, kde teče elektrický proud, nebo tam, kde se mění elektrické pole s časem. Trojice rovnic pro časový vývoj elektrického pole. Druhý člen na pravé straně se někdy nazývá „Maxwellův posuvný proud“.

**Druhá Maxwellova rovnice** je zákon elektromagnetické indukce a vyjadřuje Faradayův indukční zákon. Integrální tvar rovnice:

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (1.2)$$

*Faradayův indukční zákon:* Záporně vzatá časová změna magnetického indukčního toku,  $-\partial\Phi/\partial t$  plochou, která je ohraničena spojitou křivkou  $l$ , je rovna cirkulaci vektoru intenzity elektrického pole  $E$  po této křivce.

**Třetí Maxwellova rovnice** představuje Gaussovu větu elektrostatiky. Integrální tvar rovnice:

$$\oint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q \quad (1.3)$$

*Gaussova věta elektrostatiky:* Výtok vektoru elektrické indukce  $D$  ven z uzavřené plochy  $S$  je roven náboji  $Q$  v prostoru ohraničeném  $S$ . Zdrojem elektrických polí jsou elektrické náboje.

**Čtvrtá Maxwellova rovnice** je vlastně zákon spojitosti indukčního toku. Integrální tvar rovnice:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (1.4)$$

*Gaussova věta magnetostatiky:* Magnetické pole nemá žádné zdroje. Neexistuje magnetický monopol. Integrál vektoru magnetické indukce  $B$  po uzavřené ploše  $S$  je roven nule.

Popis elektromagnetického pole integrálními rovnicemi (1.1) až (1.4) má obecnou platnost. Analýza pole, tedy hledání prostorového nebo časového rozložení intenzit či indukcí pole, je však jejich prostřednictvím velmi obtížná. Pro mnoho situací analytické řešení (1.1) až (1.4) dosud neexistuje, a tudíž musíme využít numerické metody. Velmi často se k řešení integrálních rovnic využívají tzv. momentové metody. Tyto metody jsou založeny na převedení integrální rovnice na soustavu rovnic lineárních. Po vyřešení soustavy (např. Gaussovou eliminací) dostáváme místo hledané závislosti veličiny na prostorové souřadnici či čase její diskrétní hodnoty v příslušné doméně.

Další možností, jak se ze vzniklé situace dostat, je převést integrální rovnice (1.1) až (1.4) na rovnice diferenciální

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.5)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.6)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (1.7)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (1.8)$$

V (1.7) značí symbol  $\rho$  [C.m<sup>-3</sup>] objemovou hustotu náboje.

Diferenciální rovnice (1.5) až (1.8) se sice řeší snáze, avšak na druhou stranu nemají obecnou platnost. Platí totiž pouze v oblastech, ve kterých jsou vektory  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{D}$  a  $\mathbf{B}$  spojitě, a tudíž diferencovatelné. Zmíněné vektory nejsou spojitě tam, kde nejsou spojitě materiálové konstanty  $\epsilon$ ,  $\mu$  a  $\gamma$ , tedy na rozhraní dvou prostředí. Při řešení takového případu musíme nalézt samostatné řešení zvlášť pro každou materiálovou oblast a poté získaná řešení „spojit“ prostřednictvím okrajových podmínek na rozhraní. Složky vektorů intenzit  $\mathbf{H}$  a  $\mathbf{E}$  tečné k rozhraní a složky vektorů indukcí  $\mathbf{D}$  a  $\mathbf{B}$  kolmé k rozhraní musejí být v obou prostředích stejné.

## 1.2 Magnetické veličiny

**Magnetický tok** ( $\Phi$ ) je vektorová fyzikální veličina, která vyjadřuje počet (indukčních) siločar magnetického pole procházejících danou plochou, kolmou na směr orientace siločar. Fyzikální jednotka magnetického toku v mezinárodní soustavě jednotek SI je Weber [Wb] a voltsekunda [Vs].

**Intenzita magnetického pole** ( $H$ ) je vektorová fyzikální veličina, která vyjadřuje „mohutnost“ magnetického pole v závislosti na faktorech, které pole vytvářejí (např. velikost elektrického proudu, tekoucího vodičem cívky) a nezávisle na parametrech prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvářeno. Fyzikální jednotka intenzity magnetického pole v mezinárodní soustavě jednotek SI je ampér na metr [ $\text{Am}^{-1}$ ].

**Magnetická indukce** ( $B$ ) je vektorová fyzikální veličina, která vyjadřuje počet (indukčních) siločar magnetického pole procházejících jednotkovou plochou ( $1\text{m}^2$ ), kolmou na směr siločar – tj. hustotu (indukčních) siločar daného magnetického pole. Fyzikální jednotka magnetické indukce v mezinárodní soustavě jednotek SI je Tesla [ $\text{T}$ ] a voltsekunda/ $\text{m}^2$  [ $\text{Vsm}^{-2}$ ].

**Permeabilita** neboli prostupnost prostředí ( $\mu$ ) je skalární fyzikální veličina, která vyjadřuje magnetickou polarizovatelnost (magnetickou „vodivost“, prostupnost pro magnetické pole) prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvářeno. Fyzikální jednotka permeability prostředí v mezinárodní soustavě jednotek SI je henry na metr [ $\text{Hm}^{-1}$ ] a tesla/ampér/m [ $\text{T/Am}^{-1}$ ].

**Permeabilita** neboli prostupnost vakua ( $\mu_0$ ) čili magnetická indukční konstanta vakua je skalární fyzikální veličina, vyjadřující magnetickou polarizovatelnost (magnetickou „vodivost“, prostupnost pro magnetické pole) vakua je  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} = 1,256637 \cdot 10^{-6} \text{ T/Am}^{-1} = 1 \text{ G/Oe}$  gauss na oersted.

**Relativní (poměrná) permeabilita** neboli prostupnost prostředí ( $\mu_r$ ) je skalární fyzikální veličina, popisující relativní magnetickou polarizovatelnost (magnetickou „vodivost“, prostupnost pro magnetické pole) prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvářeno. Tato fyzikální veličina tedy vyjadřuje, kolikrát je dané prostředí magneticky polarizovatelnější (magneticky „vodivější“, prostupnější pro magnetické pole), než vakuum, je to veličina bezrozměrná [1].

### 1.2.1 Hopkinsonův zákon

Ze čtvrté Maxwellovy rovnice (1.4) a po malé úpravě první Maxwellovy rovnice (1.1) se dostaneme k analýze magnetických obvodů (1.9), která je založena na obou základních zákonech stacionárního magnetického pole.

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad a \quad \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum \mathbf{I} = NI = U_m \quad (1.9)$$

$U_m$  je magnetomotorické napětí a jednotkou je ampér nebo také ampérvolt.

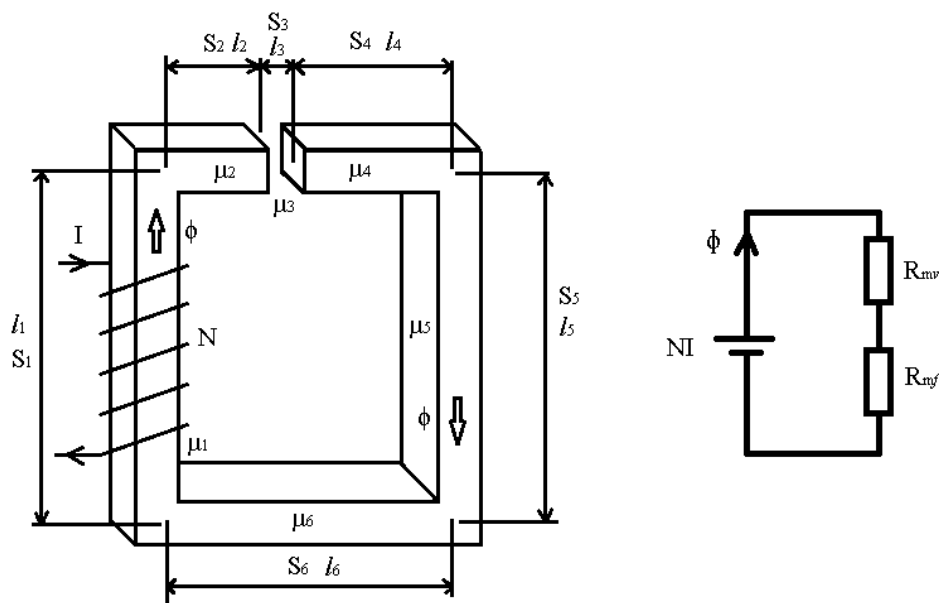
Má-li obvod stálý průřez  $S = \text{konst.}$  a na délce  $l$  homogenní látku, lze výraz pro magnetický odpor psát jednoduše ve tvaru:

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \quad (2.0)$$

Kde  $R_m$  nazýváme magnetický odpor nebo reluktance je jednotkou je  $1/\text{Henry}$  [ $\text{H}^{-1}$ ].

Soustavu do sebe uzavřených oblastí, kterými prostupuje týž magnetický tok, označujeme jako jednoduchý magnetický obvod. Vztah mezi magnetickým indukčním tokem  $\Phi$ , magnetomotorickým napětím  $U_m$ , které v obvodu působí, geometrickými rozměry a magnetickými vlastnostmi obvodu je analogií Ohmova zákona a nazývá se právě Hopkinsonův zákon, který můžeme slovně vyjádřit: Magnetický tok v magnetickém obvodu je přímoúměrný magnetomotorickému napětí a nepřímoúměrný magnetickému odporu.

$$U_m = NI = \Phi R_m \quad (2.1)$$



Obrázek 1.1: Náhradní schéma magnetického obvodu.

Na obrázku 1.1 je znázorněno převedení magnetického obvodu na náhradní elektrické schéma, pomocí Hopkinsonova zákona, aby bylo možné spočítat magnetický tok jako elektrický proud v elektrickém obvodu a magnetické odpory neboli reluktance  $R_{mv}$  a  $R_{mf}$ , které odpovídají rovnici (2.0), kde  $R_{mv}$  odpovídá magnetickému odporu vzduchové mezery a  $R_{mf}$  magnetickému odporu feromagnetika.



Elektrický obvod		Magnetický obvod	
U	elektromotorické napětí	NI	magnetomotorické napětí
I	elektrický proud	$\Phi$	magnetický tok
R	rezistance	$R_m$	reluktance
$\gamma$	konduktivita	$\mu$	permeabilita

Tabulka 1.1: Analogické veličiny elektrických a magnetických obvodů.

### 1.3 Reakce materiálu na působení magnetického pole

Magnetické pole může být vytvořeno v jakémkoli prostředí. Experimentálně však bylo ověřeno, že magnetické pole určité intenzity vyvolá v různých prostředích odlišné účinky. Protože intenzita magnetického pole je nezávislá na prostředí, mění se v závislosti na magnetických vlastnostech prostředí magnetická indukce. Rozdílné magnetické vlastnosti prostředí vyjadřuje zejména relativní (poměrná) permeabilita prostředí, podle jejíž hodnoty rozlišujeme materiály:

**Diamagnetické** ( $\mu_r < 1$ ) – vnější magnetické pole je tímto prostředím mírně zeslabováno. Mezi diamagnetické látky jsou zařazovány inertní plyny, bromid draselný, voda ( $\mu_r = 0,999\,991$ ), kuchyňská sůl ( $\mu_r = 0,999\,9984$ ), měď ( $\mu_r = 0,999\,990$ ), bizmut ( $\mu_r = 0,999\,848$ ), rtuť, zinek, olovo, stříbro, zlato, některé plasty, organické látky, supravodiče a další látky.

**Paramagnetické** ( $\mu_r > 1$ ) – jejich atomy mají ve valenční sféře elektronového obalu zpravidla méně než 4 elektrony a vnější magnetické pole je tímto prostředím mírně zesilováno. Do skupiny paramagnetických látek je řazen např. plyný kyslík ( $\mu_r = 1,000\,001\,860$ ), kapalný kyslík ( $\mu_r = 1,003\,620$ ), hliník ( $\mu_r = 1,000\,023$ ), platina ( $\mu_r = 1,000\,264$ ), paládium, vanad, chrom, titan, ebonit, hořčík, sodík, draslík, vzduch, různé přechodné kovy, kovy vzácných zemin, aktinidy a jiné látky.

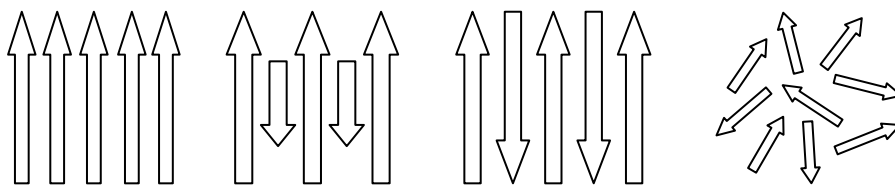
**Feromagnetické** ( $\mu_r \gg 1$ ), řádově  $100 \div 100\,000$ ) – jejich atomy mají částečně neobsazené některé vnitřní sféry elektronového obalu a současně splňují požadavek na určitý interval hodnot poměru mezi meziatomovou vzdáleností a poloměrem atomu. Vnější magnetické pole je tímto prostředím velmi zesilováno. Jsou to vlastně paramagnetické látky obsahující v pevném stavu skupiny atomů (tzv. domény neboli Weissovy oblasti o objemu  $0,001 \div 1\text{ mm}^3$ , které „oddělují“ od okolí tzv. Blochovy stěny o tloušťce  $10^{-6} \div 10^{-8}\text{ mm}$ ), jejichž magnetické momenty jsou spontánně (tj. i bez působení vnějšího magnetického

pole) shodně orientovány (tzv. nasycený stav). Výsledné magnetické momenty jednotlivých domén jsou však opět orientovány neuspořádaně („náhodně“) a navzájem se vykompenzovávají – materiál je nemagnetický. Vlivem vnějšího magnetického pole se natáčí magnetické momenty celých domén, což se projeví velkým zesílením magnetického pole a zpravidla i zmagnetováním těchto materiálů. Překročíme-li při ohřívání určitou hodnotu teploty (tzv. Curieova teplota, např. pro železo 770°C), změní se feromagnetická látka v paramagnetickou a pokud je zmagnetována, dojde k jejímu odsmagnetování. Mezi feromagnetické látky je řazeno železo, kobalt, nikl, gadolinium a jejich slitiny. Zvláštními druhy feromagnetických materiálů jsou:

a) **antiferomagnetické materiály** – jednotlivé atomy mají stejně velké a opačně orientované magnetické momenty. Příkladem těchto látek je např. chrom a mangan.

b) **ferimagnetické materiály** – jednotlivé atomy mají nestejně velké a opačně orientované magnetické momenty (zvláštní případ antiferomagnetik). Příkladem těchto látek jsou zejména ferity, vyráběné práškovou technologií z oxidu železa  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a sloučenin jiných kovů případně vzácných zemin (mangan, neodym, barium, stroncium, atd.). Kromě velké hodnoty poměrné permeability ( $\mu_r = 102 \div 105$ ) mají mnohem větší měrný elektrický odpor, než feromagnetické látky a používají se proto např. pro výrobu jader cívek vysokofrekvenčních obvodů [1].

Feromagnetický, ferimagnetický, antiferomagnetický, paramagnetický materiál



Obrázek 1.2: Uspořádání magnetických momentů různých materiálů.

## 1.4 Feromagnetické materiály a jejich vlastnosti

Feromagnetické látky mají mezi magnetiky zvláštní postavení proto, že je možné vzbudit v nich i poměrně slabým magnetickým polem velmi silnou magnetizaci. Tu jsou si schopny podržet i po odstranění vnějšího magnetického pole, což má i praktický význam.

Feromagnetismus (na rozdíl od diamagnetizmu a paramagnetizmu) je vlastností pevných kovových i nekovových látek s krystalickou stavbou. Feromagnetismus vykazuje

železo, kobalt, nikl, dysprosium, gadolinium a ferity (oxidy železa s oxidy jiných kovů) a některé slitiny. Susceptibilita feromagnetických látek významně závisí na nejen na teplotě (s rostoucí teplotou feromagnetismus klesá, až při tzv. Curieově teplotě zcela zaniká), ale i na intenzitě magnetizujícího pole.

Všechny feromagnetické látky obsahují domény, mikroskopické oblasti, v nichž jsou magnetické momenty jednotlivých částic souhlasně orientovány. V nezmagnetovaných materiálech jsou domény orientovány nahodile, proto je výsledná magnetizace nulová. Je-li materiál zmagnetován, dojde k orientaci domén.

Feromagnetika dosahují nasycení snadno. Záleží však na historii magnetika, tj. v jakém stavu bylo před počátkem magnetizace. Magnetizace, která v látce vznikne bez působení vnějšího pole, je nazývána magnetizací spontánní.

Když sledujeme magnetizaci vzorku, který nebyl dosud zmagnetován, můžeme sledovat poměrně rychlý nárůst magnetizace do okamžiku nasycení. Při dalším zvyšování intenzity však magnetizace narůstá jen pomalu, až se docela nárůst zastaví. Začneme-li intenzitu pole snižovat, průběh magnetizace probíhá po odlišné křivce; nulové hodnotě intenzity pole neodpovídá nulová, ale určitá hodnota magnetizace, tzv. remanentní magnetizace. Tento jev je označován jako hystereze. Nulových hodnot magnetizace lze docílit až při opačné orientaci pole (koercitivní pole). Při dalším snižování intenzity se docílí demagnetizace materiálu. Hysterezní smyčkou pak nazýváme uzavřenou, cyklicky se opakující, křivku.

Při rychlých přechodech z kladných do záporných hodnot a zpět vznikají ztráty energie, které se projevují zahřátím magnetika. Hysterezní ztráty jsou úměrné ploše hysterezní smyčky. Je-li hysterezní křivka materiálu široká, jedná se o látku magneticky tvrdou. Taková feromagnetika jsou např. permanentní (trvalé) magnety, které mohou být zdrojem magnetického pole. V případě úzké hysterezní křivky se jedná o měkká feromagnetika, využívaná jako materiál pro jádra transformátorů, generátorů, elektromotorů a hlav pro snímání informace ze záznamových magnetických médií např. (pevných disků počítačů, disket, magnetofonových pásek) [2].

## **1.5 Hodnocení vlastností magnetických materiálů**

V technické praxi se nejčastěji používají feromagnetické materiály, jejichž magnetické vlastnosti (permeabilita  $\mu$ ) však jsou výrazně a navíc nelineárně závislé na intenzitě

magnetického pole ( $H$ ). Pro hodnocení a případně porovnání jejich magnetických parametrů se proto používá grafických metod s využitím zejména magnetizační a hysterezní křivky.

Magnetizační křivky neboli křivky prvotní magnetizace vyjadřují závislost hodnoty magnetické indukce ( $B$ ) na měnící se hodnotě intenzity magnetického pole ( $H$ ) materiálu, který ještě nebyl magnetován (nebyl záměrně vystaven působení magnetického pole).

Hysterezní křivky (smyčky) vyjadřují závislost hodnoty magnetické indukce ( $B$ ) na měnící se hodnotě intenzity magnetického pole ( $H$ ), při opakované a protisměrné magnetizaci daného feromagnetického materiálu.

Magnetické vlastnosti feromagnetických látek definuje magnetizační křivka s hysterezní smyčkou, tj. znázornění závislosti hodnoty magnetické indukce ( $B$ ) na hodnotě intenzity magnetického pole ( $H$ ):  $B = f(H)$ . Pro porovnání vlastností magneticky tvrdých materiálů je postačující II. kvadrant hysterezní smyčky (tato část je často označována jako demagnetizační křivka). Hodnoty zbytkové remanence ( $B_r$ ) a koercitivity ( $H_c$ ) charakterizují společně s maximálním energetickým součinem  $(B \cdot H)_{\max}$  nejdůležitější magnetické vlastnosti trvalého magnetu [1].

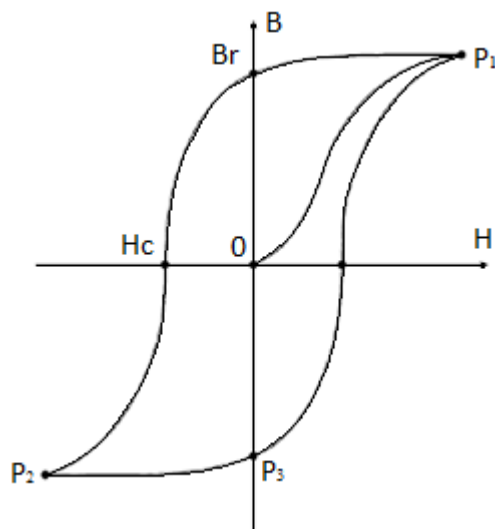
## 1.6 Magnetizační panenská křivka

Magnetizační křivky feromagnetických materiálů nemají stejný průběh v procesu zesilování a v procesu zeslabování vnějšího magnetického pole. Závislost magnetické indukce  $B$  na intenzitě magnetického pole  $H$  je na obrázku 1.3. Křivka  $OP_1$  se nazývá **magnetizační panenská křivka** nebo také **křivka prvotního magnetování** (na počátku je materiál nezmagnetovaný). Při nízkých hodnotách  $H$  je děj z velké části vratný (při snížení magnetické intenzity na nulu bude materiál opět nemagnetický). Při vyšších hodnotách  $H$  (lineární část panenské křivky) dochází k posuvům nevratným, které se dějí po skocích. Křivka končí v bodě  $P_1$ , ve kterém magnetizace dosahuje nasycené hodnoty  $s M$  (všechny magnetické momenty jsou orientovány do směru vnějšího pole).

## 1.7 Hysterezní smyčka

Budeme-li snižovat magnetické pole až na nulovou hodnotu, magnetizace nevymizí, křivka bude protínat osu, na kterou se vynáší velikost magnetické indukce. Magnetická

indukce má v tomto bodě velikost  $B_r$ , která se nazývá **remanentní pole** (jedná se o zbytkovou indukci magnetického pole). Změníme-li nyní směr vnějšího pole v opačný, zjistíme, že pro určitou nenulovou hodnotu intenzity magnetického pole  $H_c$ , je velikost magnetické indukce nulová.  $H_c$  se nazývá **koercitivní síla**. Zvyšujeme-li dále magnetické pole v opačném směru, dospějeme znovu do stavu nasycení v bodě  $P_2$  a opětovným snižováním magnetického pole a jeho přepólováním se zase dostaneme do bodu  $P_1$  [3].



Obrázek 1.3: Hysterezní křivka s prvotní magnetizací.

Závislost  $B$  na  $H$  podle Obrázek 1.3, tedy to, že  $B$  závisí nejen na hodnotě  $H$ , ale i na tom, jakou cestou k magnetizaci došlo, se nazývá **hystereze** a křivka na obrázku se nazývá **hysterezní smyčka**. Pro feromagnetické látky lze zavést pojem permeability  $\mu$  a relativní permeability  $\mu_r$ . Definuje se

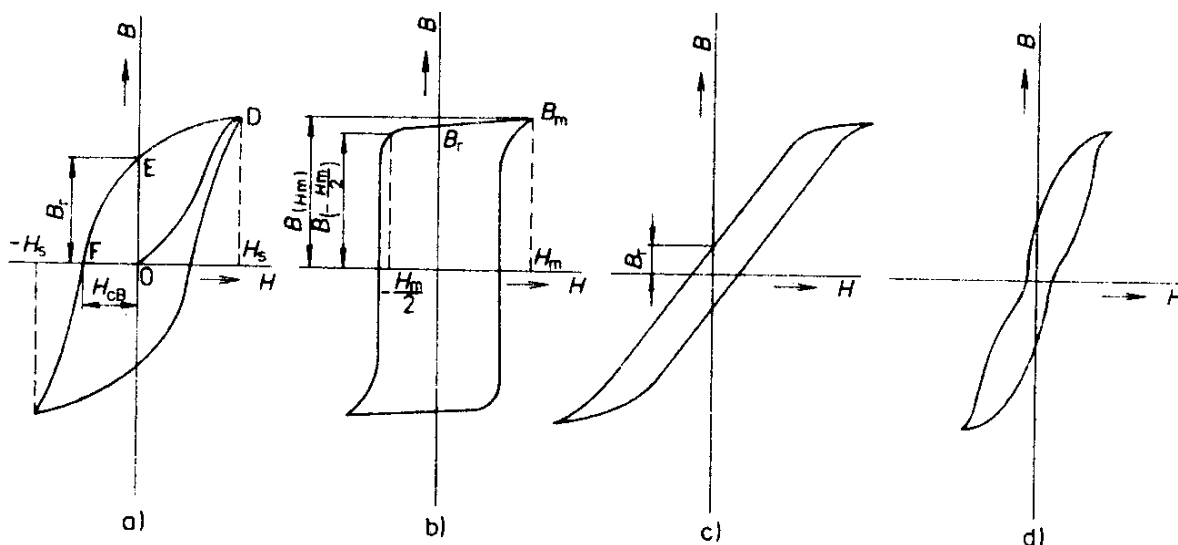
$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.2)$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (2.3)$$

přičemž se požaduje, aby magnetizace probíhala po panenské křivce.

Podle tvaru hysterezní smyčky je rozlišujeme na několik typů, viz obrázek 1.4:

- a) normální – poměr  $B_R/B_S = 0,5$  až  $0,8$
- b) pravoúhlý – poměr  $B_R/B_S$  se blíží jedné
- c) plochý – poměr  $B_R/B_S = 0,1$  až  $0,2$
- d) perminvarový – smyčka je ve střední části zúžená



Obrázek 1.4: Hysterezní smyčky a) normální, b) pravoúhlý, c) plochý, d) perminvarový

## 1.8 Demagnetizační křivka

Magnetické vlastnosti trvalého magnetu lze stanovit z demagnetizační křivky feromagnetického materiálu, ze kterého jsou vyrobeny. Základní hodnoty demagnetizační křivky  $B_r$  (remanentní magnetická indukce neboli remanence) a  $H_c$  (koercitivní intenzita magnetického pole neboli koercitivita) charakterizují nejdůležitější magnetické vlastnosti trvalého magnetu.

Při měření jsou feromagnetické materiály vystaveny vnějšímu magnetickému poli, které způsobuje změnu (indukovaného) magnetického momentu. Největší možný energetický součin  $(B \cdot H)_{\max}$  popisuje nejvyšší tok energie dosažitelné s tímto materiálem. Čím vyšší je jeho hodnota, tím menší může být při jinak stejných poměrech objem magnetu, potřebný pro určité zadání. Různé magnetické materiály, kovové (vzácné zeminy), keramické (ferity) a magnety, pojené plastem, reprezentují různé magnetické oblasti. Kupříkladu se rozlišují sintrované anizotropní magnety NdFeB a anizotropní ferity magneticky tvrdé. Tyto se dále liší od izotropních tvrdých feritů, pojených plastem, vždy asi o desetinásobek energetického součinu [1].

## 1.9 Ztráty v magnetických obvodech

V magnetických obvodech rozlišujeme tři druhy ztrát. Jsou to ztráty hysterezní, vířivými proudy a přídavné ztráty. První dva druhy ztrát lze spočítat. Přídavné ztráty lze určit pouze jako rozdíl celkových a ostatních dvou.

$$P_{Fe} = P_h + P_v + P_p \quad (2.4)$$

$P_{Fe}$  – celkové ztráty v magnetickém obvodu (v železe),  $P_h$  – hysterezní ztráty,  $P_v$  – ztráty vířivými proudy,  $P_p$  – přídavné ztráty

- **Hysterezní ztráty** jsou způsobeny střídavou magnetizací, kdy v důsledku existence hystereze dochází při přemagnetování ke spotřebování energie. Čím větší je plocha hysterezní smyčky, tím jsou tyto ztráty větší. Hysterezní ztráty jsou tedy úměrné kmitočtu a ploše statické hysterezní smyčky a lze je v praxi snížit pouze volbou materiálu s menší hysterezní smyčkou.

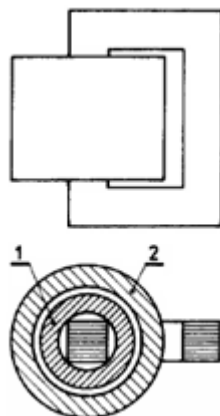
- **Ztráty vířivými proudy** jsou způsobeny vířivými proudy (Foucaultovy proudy), které vznikají v důsledku elektrické vodivosti magnetického materiálu. Pokud vložíme elektrický vodič do proměnného magnetického pole, indukuje se v něm napětí a v závislosti na velikosti jeho odporu jím protéká proud. Ztráty vířivými proudy lze v praxi snížit dvěma způsoby. První možností je sestavení magnetického obvodu ze vzájemně izolovaných plechů. Druhou možností je zvýšení odporu materiálu, což u ocelových plechů se realizuje přidáním křemíku. Mluvíme pak o křemíkových ocelích. Křemík však zvyšuje křehkost materiálu, proto do dynamoplechů se přidává pouze do 2,5 % Si a do transformátorových plechů do 4 % Si.

- **Přídavné ztráty** jsou způsobeny dalšími vlivy, jako je například nedostatečné stažení magnetického obvodu, okrajové jevy. Nelze je samostatně kvantifikovat. Abychom mohli sledované materiály porovnávat, zavádíme měrné ztráty. Vzhledem k tomu, že ztráty jsou závislé na magnetické indukci a na frekvenci, jsou vždy doplněny o údaj, při jaké indukci a frekvenci byly měřeny ( $p_{1,7/50}$  jsou měrné ztráty při indukci 1,7 T a frekvenci 50 Hz).

$$p = \frac{P_{Fe}}{V \cdot \rho} \quad (2.5)$$

$p$  – měrné ztráty,  $P_{Fe}$  – celkové ztráty,  $V$  – objem magnetika,  $\rho$  – hustota magnetika

Měrné ztráty  $p$  ( $\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) ve feromagnetickém materiálu jsou ztráty v 1 kg uvažovaného materiálu při sinusové magnetické indukci s amplitudou 1T nebo 1,5T při frekvenci 50Hz. Označují se  $p_{1,0}$  nebo  $p_{1,5}$  [4].



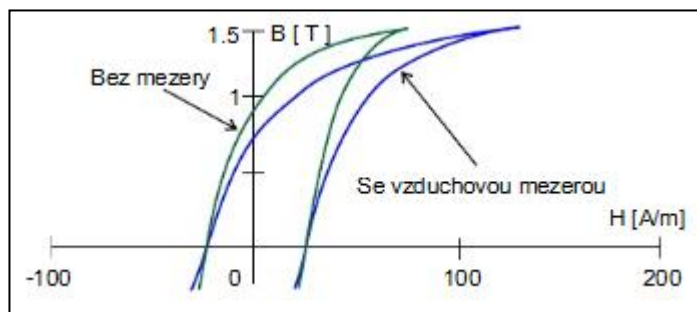
Obrázek 1.5: Navinutá cívka na feritovém jádře.

1 – primární vinutí

2 – sekundární vinutí

## 1.10 Vzduchová mezera magnetického obvodu

Vzduchová mezera způsobuje změnu tvaru magnetizační smyčky, jak je uvedeno na obrázku 1.6. Snižuje se remanentní indukce  $B_r$  při zachování indukce nasycení  $B_s$ . Přičemž plocha magnetizační smyčky, vyjadřující ztráty magnetického obvodu, zůstane stejná. Smyčka se zúží, ale koercitivní síla  $H_c$  zůstane téměř stejná. Střední délka magnetického obvodu se tak prodlouží o délku vzduchové mezery. V otevřeném magnetickém obvodu se sice magnetický tok zeslabí podle šířky vzduchové mezery, ale nezanikne a bude protékat mezerou od severního pólu k jižnímu pólu, protože i vzduch je magneticky vodivý.



Obrázek 1.6: Vliv vzduchové mezery na tvar magnetizační smyčky – Faktor, 1999 str. 28



## 2 Komunikační počítačové prostředky

### 2.1 MATLAB

Název MATLAB vznikl zkrácením slov MATrix LABoratory (volně přeloženo „laboratoř s maticemi“), což odpovídá skutečnosti, že klíčovou datovou strukturou při výpočtech v MATLABu jsou matice. Vlastní programovací jazyk vychází z jazyka Fortran.

MATLAB je nástroj jak pro pohodlnou interaktivní práci, tak pro vývoj širokého spektra aplikací. Výpočetní systém MATLAB se během uplynulých let stal celosvětovým standardem v oblasti technických výpočtů a simulací ve sféře vědy, výzkumu, průmyslu i v oblasti vzdělávání.

MATLAB je programové prostředí a skriptovací programovací jazyk pro vědeckotechnické numerické výpočty, modelování, návrhy algoritmů, počítačové simulace, analýzu a prezentaci dat, paralelní výpočty, měření a zpracování signálů, návrhy řídicích a komunikačních systémů.

MATLAB poskytuje svým uživatelům nejen mocné grafické a výpočetní nástroje, ale i rozsáhlé specializované knihovny funkcí spolu s výkonným programovacím jazykem čtvrté generace. Knihovny jsou svým rozsahem využitelné prakticky ve všech oblastech lidské činnosti.

Díky své architektuře je MATLAB určen zejména těm, kteří potřebují řešit početně náročné úlohy a přitom nechtějí nebo nemají čas zkoumat matematickou podstatu problémů. Více než milion uživatelů po celém světě využívá možnosti jazyka MATLABu, který je mnohem jednodušší než například Fortran nebo C, který skýtá obrovský potenciál produktivity a tvořivosti. Za nejsilnější stránku MATLABu je považováno mimořádně rychlé výpočetní jádro s optimálními algoritmy, které jsou prověřeny léty provozu na špičkových pracovištích po celém světě. MATLAB byl implementován na všech významných platformách (Windows, Linux, Solaris, Mac) [6].

### 2.1.1 Struktura programu

skládá se z pěti hlavních částí:

- ***Vývojové prostředí***

Tato sada nástrojů a prostředků pomáhá v práci s funkcemi a soubory. Mnoho z nich má grafické uživatelské prostředí. To zahrnuje plochu MATLABu, příkazové okno, historii příkazů, editor, ladící software a prohlížeč helpu, plochy, souborů a vyhledávací cesty.

- ***Knihovna matematických funkcí MATLABu***

Je to mohutná sada výpočetních algoritmů v rozsahu od elementárních funkcí jako suma, sin, cos a komplexní aritmetika k funkcím sofistikovanějším jako je inverze matice, vlastní čísla matice, Besselovy funkce a rychlá Fourierova transformace.

- ***Jazyk MATLAB***

Je to pokročilý jazyk pro práci s maticemi a poli s možností řízení výpočtu. Umožňuje práci s datovými strukturami, s vstupem a výstupem. Je zahrnuta podpora objektového programování. To umožňuje dvě věci; jak velmi rychle udělat jednoduchý program, tak vytvářet složité komplexní aplikace.

- ***Grafika***

MATLAB má rozsáhlé prostředky pro zobrazení vektorů a matic jako grafy, právě tak jako možnosti popisu a tisku těchto grafů. Obsahuje mnoho funkcí pro 2D a 3D vizualizaci dat, zpracování obrazu, animací a prezentací grafiky.

- ***Rozhraní MATLABu***

Pro aplikační programy (API). Tato knihovna nám umožňuje psát programy v C a ve Fortranu, které komunikují s MATLABem. To zahrnuje prostředky pro volání podprogramů z MATLABu (dynamické linky), volání výpočetního jádra MATLABu, a umožňuje čtení a zápis MAT souborů [7].

### 2.1.2 Instrument Control Toolbox

Instrument Control Toolbox umožňuje komunikovat s přístroji, jako jsou osciloskopy, generátory funkčních průběhů a dalšími analytickými přístroji přímo z MATLABu. Komunikace probíhá na základě ovladačů zařízení, jako je IVI nebo VXI plug&play, a běžně používaných komunikačních protokolů, jako jsou GPIB (IEEE-48), VISA, TCP/IP a UDP. S Instrument Control Toolboxem je možné generovat data v Matlabu a posílat je do

přístrojů, nebo načítat data z přístrojů do MATLABu pro analýzu a vizualizaci. Data přenášena mezi MATLABem a přístrojem mohou být binární nebo textová (tj. příkazy v jazyce SCPI). Přenos může být synchronní nebo asynchronní a je řízen pomocí událostí. Lze tak vytvářet složitá automatizovaná měřící pracoviště [6].

### **2.1.3 Instrument Control Toolbox Block Library**

Rozšíření toolboxu o bloky poskytující stejné komunikační rozhraní s přístroji, které lze použít v nástavbě MATLABu programu Simulink. Pomocí bloků „query instrument“ a „to instrument“ lze komunikovat s přístroji právě v Simulinku.

### **2.1.4 Simulink**

Simulink je nadstavba MATLABu pro simulaci a modelování dynamických systémů, který využívá algoritmy MATLABu pro numerické řešení nelineárních diferenciálních rovnic. Poskytuje uživateli možnost rychle a snadno vytvářet modely dynamických soustav ve formě blokových schémat a rovnic.

Kromě standardních úloh dovoluje Simulink rychle a přesně simulovat i rozsáhlé „stiff“ systémy s efektivním využitím paměti počítače. Pomocí Simulinku a jeho grafického editoru lze vytvářet modely lineárních, nelineárních, v čase diskrétních nebo spojitých systémů pouhým přesouváním funkčních bloků myší. Simulink také umožňuje spouštět určité části simulačního schématu na základě výsledku logické podmínky. Tyto spouštěné a povolované subsystemy umožňují použití programu v náročných simulačních experimentech. Samozřejmostí je otevřená architektura, která dovoluje uživateli vytvářet si vlastní funkční bloky a rozšiřovat již tak bohatou knihovnu Simulinku. Hierarchická struktura modelů umožňuje koncipovat i velmi složité systémy do přehledné soustavy subsystemů prakticky bez omezení počtu bloků. Simulink, stejně jako MATLAB, dovoluje připojovat funkce napsané uživateli v jazyce C. Vynikající grafické možnosti Simulinku je možné přímo využít k tvorbě dokumentace. Mezi neocenitelné vlastnosti Simulinku patří nezávislost uživatelského rozhraní na počítačové platformě. Přenositelnost modelů a schémat mezi různými typy počítačů umožňuje vytvářet rozsáhlé modely, které vyžadují spolupráci většího kolektivu řešitelů na různých úrovních [7].

## **2.2 GPIB komunikace**

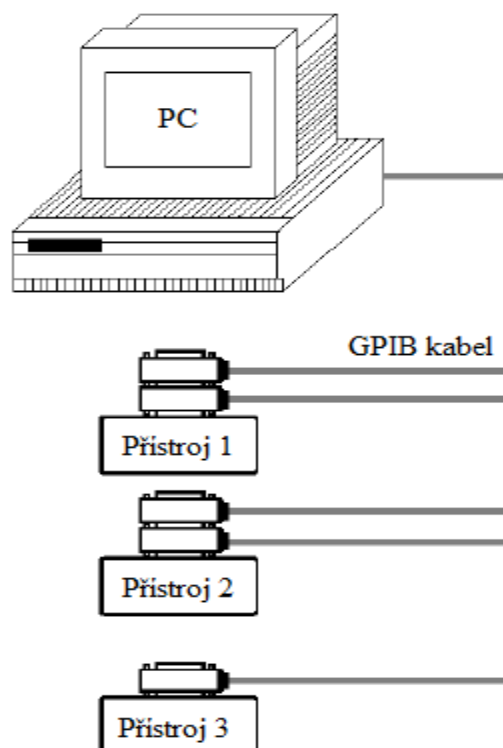
Standard GP-IB je v současnosti nejrozšířenějším způsobem propojení měřicí techniky ve světě. Sběrnice umožňuje propojit měřicí přístroje do automatizovaného měřicího systému. Tyto měřicí přístroje jsou většinou schopny jak autonomního provozu (local), tak i provozu v systému řízeném počítačem (remote). Standard se velmi osvědčil, vyznačuje se velkou spolehlivostí, snadným použitím, dobrou programovou podporou na PC a také relativně vysokou morální životností vzhledem např. k výpočetní technice [8].

Sběrnice byla vyvinuta ve firmě Hewlett-Packard jako firemní sběrnice HPIB. Standardizována byla v r. 1972 pod označením IEEE488. K rozšíření standardu došlo v r. 1987 pod označením IEEE488.2, přičemž původní standard je nyní označován jako IEEE488.1. V bývalém Československu byl tento standard přijat v r. 1984 pod označením IMS-2 normou ČSN356522. Odpovídá dříve v Evropě rozšířenému standardu IEC625. Od standardu IEEE488 se liší především v provedení a zapojení propojovacích konektorů.

### **2.2.1 Standard IEEE488.1**

Měřicí systém na základě sběrnice GP-IB je většinou řízen přes zásuvnou desku rozhraní osobním počítačem. Řídící počítač zajišťuje kromě řízení měřicího procesu i zpracování, prezentaci a archivaci naměřených hodnot.

Měřicí přístroje – funkční jednotky jsou připojeny ke sběrnici GP-IB a mají vzhledem k řídicí jednotce charakter jedné periferie. Kompatibility jednotlivých funkčních jednotek připojených ke sběrnici se dosahuje zařazením vhodných obvodů rozhraní mezi sběrnici GP-IB a vnitřními obvody. Splnění tohoto standardu umožňuje uživateli sestavit měřicí systém složený z přístrojů různých výrobců a použít do jisté míry libovolného počítače pro řízení. Funkčními jednotkami mohou být, jak měřicí přístroje s číslicovým výstupem, tak i jiné členy měřicích obvodů vybavené rozhraním GP-IB. Funkční jednotkou mohou být i periferie používané u počítačů (např. tiskárna) opatřené obvody rozhraní GP-IB.



*Obrázek 2.1: Uspořádání sběrnice GPIB.*

Uspořádání sběrnice je liniové, viz obrázek 2.1 funkční jednotky jsou ke sběrnici připojeny paralelně speciálními dvojíty konektory s 24 kontakty (IEEE488) nebo s 25 kontakty (IEC625), z nichž jedna strana konektoru je tvořena zásuvkou a druhá zástrčkou. Je tedy možné jednotlivé konektory vzájemně spolu libovolně propojovat. Není nutno dodržovat liniové propojení – jsou možné libovolné kombinace linie-hvězda. Jediným omezením při propojování je maximální délka kabelů 20 m a 16 připojených rozhraní. Propojování je možno provádět za provozu [8].

## 2.3 Sériová komunikace

Standard RS-232, resp. jeho poslední varianta RS-232C z roku 1969, (také sériový port nebo sériová linka) se používá jako komunikační rozhraní osobních počítačů a další elektroniky [9].

RS-232 je rozhraní pro přenos informací vytvořené původně pro komunikaci dvou zařízení do vzdálenosti 20 m. Pro větší odolnost proti rušení je informace po propojovacích vodičích přenášena větším napětím, než je standardních 5 V. Přenos informací probíhá

asynchronně, pomocí pevně nastavené přenosové rychlosti a synchronizace sestupnou hranou startovacího impulsu.

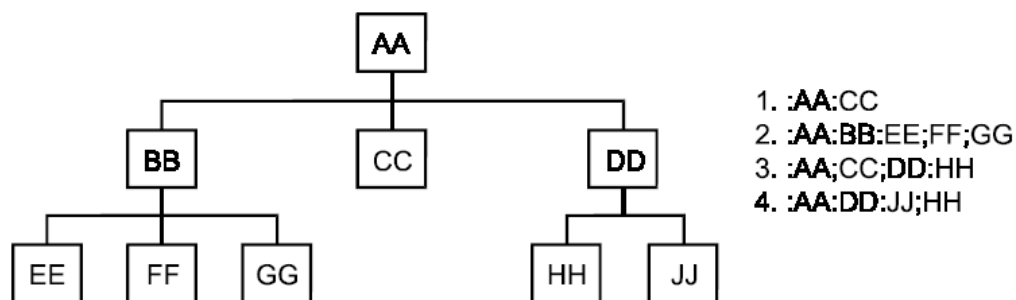
RS-232 používá dvě napěťové úrovně. Logickou 1 a 0. Log. 1 je někdy označována jako marking state nebo také klidový stav, Log. 0 se přezdívá space state. Log. 1 je indikována zápornou úrovní, zatímco logická 0 je přenášena kladnou úrovní výstupních vodičů. Nejběžněji se pro generování napětí používá napěťový zdvojovač z 5 V a invertor. Logické úrovně jsou potom přenášeny napětím +10 V pro log. 0 a -10 V pro log. 1.

## 2.4 Přístrojový jazyk – SCPI

Standard IEEE488.1 ani IEEE488.2 nedefinuje obsah přístrojových zpráv. Díky tomu jsou kódy pro různé typy dříve vyrobených přístrojů od různých výrobců naprosto odlišné a tedy i používané programové vybavení je přísně vázáno na použité typy přístrojů a zařízení. Snaha používat univerzální programové vybavení nezávisle na výrobci a typu použitého přístroje vedla přední světové výrobce měřicí techniky (Hewlett-Packard, Tektronix, Philips-Fluke, Wavetek, Racal-Dana, Keithley, Brüel&Kjaer, National Instruments) k unifikaci přístrojových zpráv. Konsorcium uvedených firem připravilo jednotný systém definování přístrojových zpráv pod názvem *System Commands for Programmable Instruments* – SCPI. Veškeré přístroje uvedené těmito firmami na trh po roce 1990 jsou programovány způsobem odpovídajícím doporučení SCPI a samozřejmě též standardu IEEE488.2. Řada přístrojů výše uvedených výrobců vyvinutých těsně před rokem 1990 má již některé prvky SCPI implementovány. Tyto přístroje lze tedy z hlediska použitého programového vybavení libovolně zaměňovat, pokud umožňují požadované funkce realizovat.

Struktura příkazu SCPI byla vytvořena na základě funkční struktury reálných přístrojů a odpovídá obecnému modelu přístroje. Všechny funkce nemusí, resp. nemohou být u jednotlivých přístrojů implementovány. Struktura příkazů je stromová (viz obrázek 2.2), u složených příkazů se jednotlivé jednoduché příkazy oddělují „:“, u vícenásobných příkazů „;“, mezera nesmí být uprostřed příkazu, slouží k oddělení těla příkazu a parametrů. Stejnou strukturu jako příkazy mají dotazy, které jsou zakončeny „?“. Vlastní kódy příkazů vycházejí z anglické terminologie a mohou se buď užívat celé, nebo zkrácené. Zkrácená

část příkazu je v seznamu příkazů zapsaná velkými písmeny a vypadá pak (např. FREQency, VOLTage, ...).



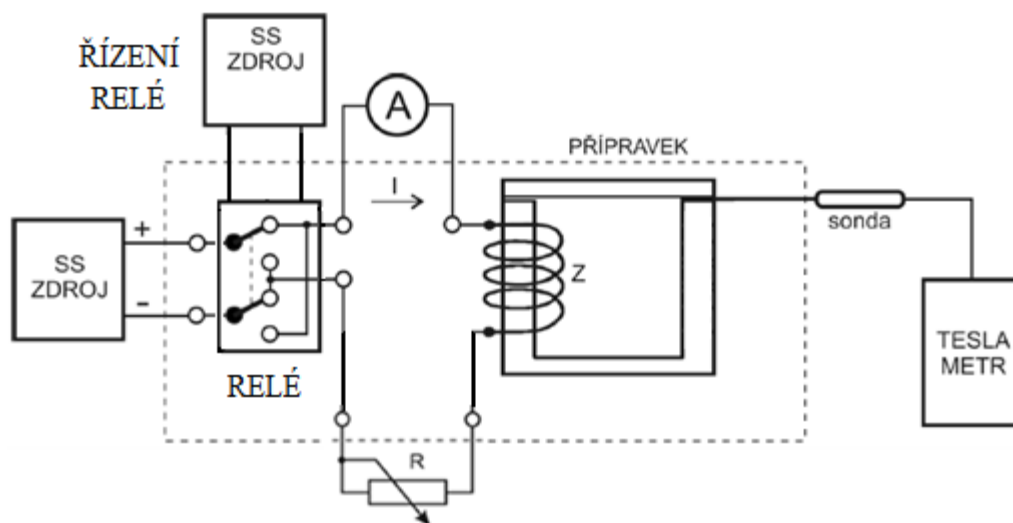
Obrázek 2.2: Stromová struktura příkazů SCPI a příklad použití oddělovačů u složených příkazů.

Systém obsahuje příkazy v několika úrovních. Nejjednodušší je použití vyšší úrovně nevyžadující podrobné znalosti vlastností a struktury přístroje. To ale neumožňuje využít všech možností přístroje (většinou dojde k automatickému nastavení „nejvýhodnějších“ podmínek dle představ výrobce). Použití nižší úrovně je složitější, neboť je třeba podrobně znát strukturu přístroje a vlastností. To pak umožní využít všech možností [10].

### 3 Návrh měření magnetických polí

#### 3.1 Měření statické hysterezní smyčky

Magnetické pole se generuje v železném prstenci, tvořícím jádro, plynule nastavitelným stejnosměrným proudem, tekoucím cívkou. Přídavným napětovým zdrojem ovládáme relé a tím měníme směr toku proudu. Proud naměřený ampérmetrem odpovídá intenzitě magnetického pole a magnetická indukce byla naměřena teslametrem. Při měření statické hysterezní smyčky byl zapojen experiment dle obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Blokové schéma zapojení

#### 3.2 Měření dynamické hysterezní smyčky

Pro vyhodnocení vlastností magnetického obvodu je zapotřebí určit hysterezní smyčku daného magnetického materiálu, z něhož se magnetický obvod skládá. Tuto hysterezní smyčku nelze změřit přímým měřením, nýbrž převodem magnetických veličin na odpovídající hodnoty elektrické. To umožňuje metoda osciloskopická, která spočívá v tom, že se vytvoří pomocnými obvody dvě střídavá napětí, z nichž jedno je úměrné intenzitě magnetického pole H, a druhé je úměrné magnetické indukci B. Současným působením obou napětí na příslušné vychylovací systémy osciloskopu se zobrazí hysterezní smyčka na stínítku osciloskopu. Napětí úměrné magnetické intenzitě H přivedeme na horizontální vstup osciloskopu X a napětí úměrné magnetické indukci B přivedeme na vertikální vstup osciloskopu Y.



Měření magnetizačních charakteristik lze provádět, buď při sinusovém průběhu magnetické indukce  $B$ , nebo při sinusovém průběhu intenzity magnetického pole  $H$ . V prvním případě je nutno použít zdroj s velmi malým vnitřním odporem a dále musí být zajištěna malá impedance magnetizačního obvodu vzorku. V druhém případě je zapotřebí zařadit do magnetizačního obvodu tak velkou lineární impedanci, že průběh magnetizačního proudu zůstane v celém rozsahu sinusový. Výsledky obou měření se od sebe poněkud liší. Je proto nutné vždy udat, jakým způsobem bylo měření prováděno. Hysterezní smyčky měřené střídavým proudem se nazývají dynamické a svým tvarem i velikostí se liší od statických. Při postupném zvyšování frekvence magnetizačního proudu se zvětšuje plocha hysterezních smyček. Příčinou zvětšení plochy jsou hlavně ztráty způsobené vířivými proudy.

Základní charakteristikou ferromagnetických materiálů je hysterezní smyčka, proto její měření patří k základním měřením. Pro magnetická měření je typická nízká přesnost způsobená mj. rozptylem magnetického pole. Nejlépe definovaná měření jsou proto měření na uzavřených vzorcích a nejvhodnější z nich je toroid. Používá se dvou vinutí, primárním vinutím se proměnné magnetické pole budí, na sekundárním se měří jeho změna, tedy měřený vzorek pracuje jako transformátor.

Magnetickou indukci zjišťujeme integrací napětí indukovaného na sekundárním vinutí. Při dynamickém měření hysterezní smyčky používáme k buzení proudu v primární cívice harmonického střídavého napětí, které nastavujeme na generátoru funkcí Agilent 33220A. V tomto případě není problém s nastavením jeho amplitudy a přípravek obsahuje i zesilovač TDA7294. V možnostech pracoviště je (a bylo odzkoušeno) měření při různých nízkých frekvencích.

### 3.2.1 Metoda měření

Měřené veličiny, intenzitu magnetického pole  $H$  a magnetickou indukci  $B$  určíme z lokálních a nepoměrně snadněji měřitelných veličin – proud  $I$  v primárním vinutí a napětí  $U$  indukované v sekundárním vinutí. Protéká-li primárním vinutím o  $N_1$  závitů proud  $I$ , budí se v toroidu magnetické pole o intenzitě  $H$  (2.6).

$$H = \frac{N_1 I}{l} \quad (2.6)$$

kde  $l$  je střední délka siločáry magnetického pole. Při zobrazování hysterezní smyčky na osciloskopu, je nutné převést primární proud na napětí. To zajistíme tím, že mu do cesty vložíme odpor  $R$ , viz obrázek 3.2, a měříme úbytek napětí  $U$  na něm. Tomuto napětí pak odpovídá intenzita magnetického pole  $H$ , kterou zjistíme dosazením z Ohmova zákona  $I = U / R$  do vztahu (2.6)

$$H = \frac{N_1 U}{l R} \quad (2.7)$$

Sekundární cívkou protéká magnetický tok

$$\Phi = N_2 B S \quad (2.8)$$

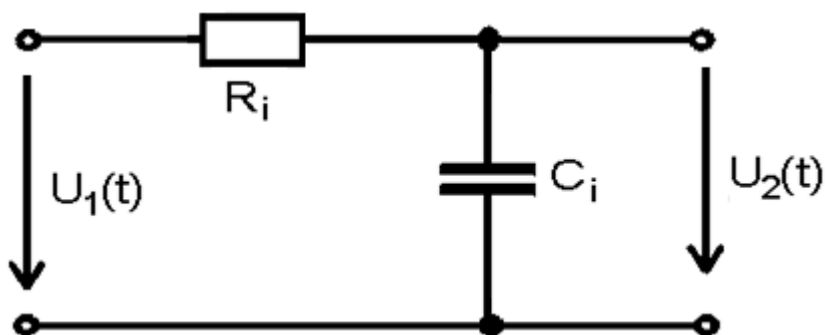
kde  $N_2$  je počet závitů sekundárního vinutí,  $B$  je magnetická indukce a  $S$  plocha příčného průřezu toroidu. Ve vztahu (2.8) zanedbáváme rozptyl magnetického pole. Proměnný magnetický tok indukuje v sekundární cívce napětí

$$U_2 = - \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d(N_2 B S)}{dt} \quad (2.9)$$

Z této rovnice vypočteme magnetickou indukci  $B$ .

$$B = \frac{1}{N_2 S} \int_0^t U_2 d\tau \quad (3.0)$$

K integraci použijeme klasického integrátoru, elektronického obvodu s jednoduchým integračním RC členem podle obrázku 3.2.

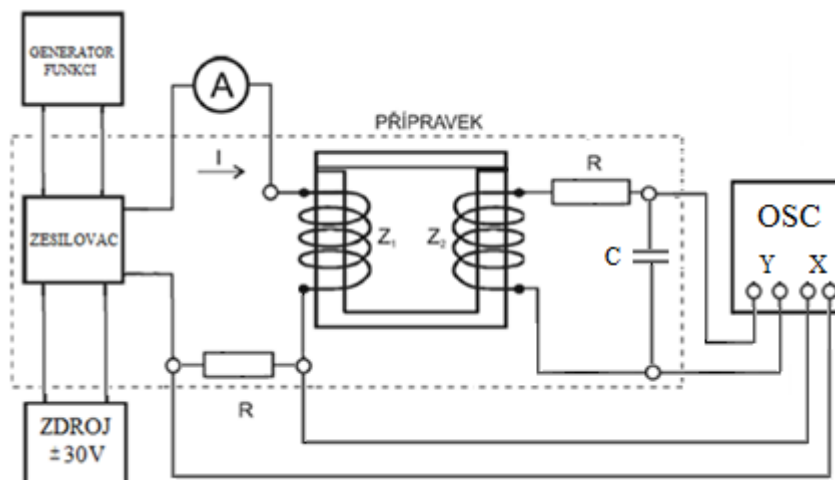


Obrázek 3.2. Jednoduchý integrační člen

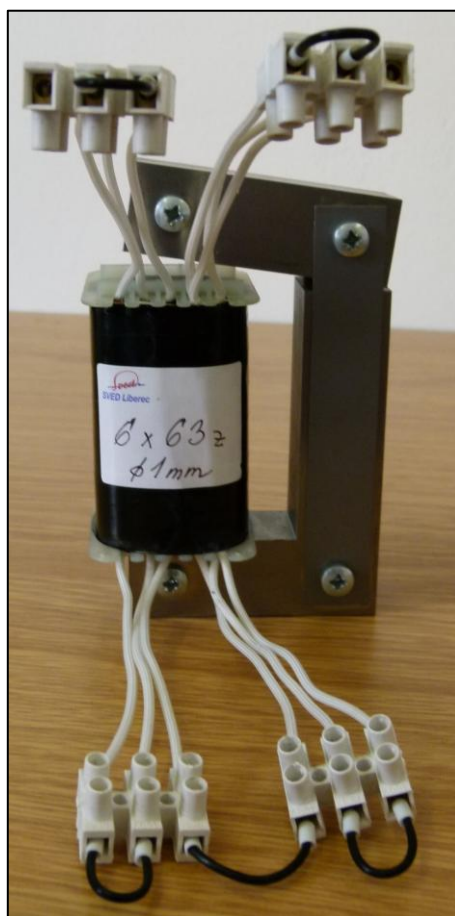
### 3.2.2 Navržený přípravek

Magnetické pole se generuje v železném prstenci, tvořícím jádro, plynule nastavitelným střídavým proudem, tekoucím dvěma cívkami. Pro měření dynamické hysterezní smyčky byl do přípravku zapojen i zesilovač TDA 7294, který musí být napájen stejnosměrným

napětím  $+30\text{V}$  i  $-30\text{V}$  a poté nám zesiluje sinusový signál z generátoru funkcí zhruba  $7\times$ .  
Blokové schéma přípravku vidíme na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Blokové schéma zapojení přípravku

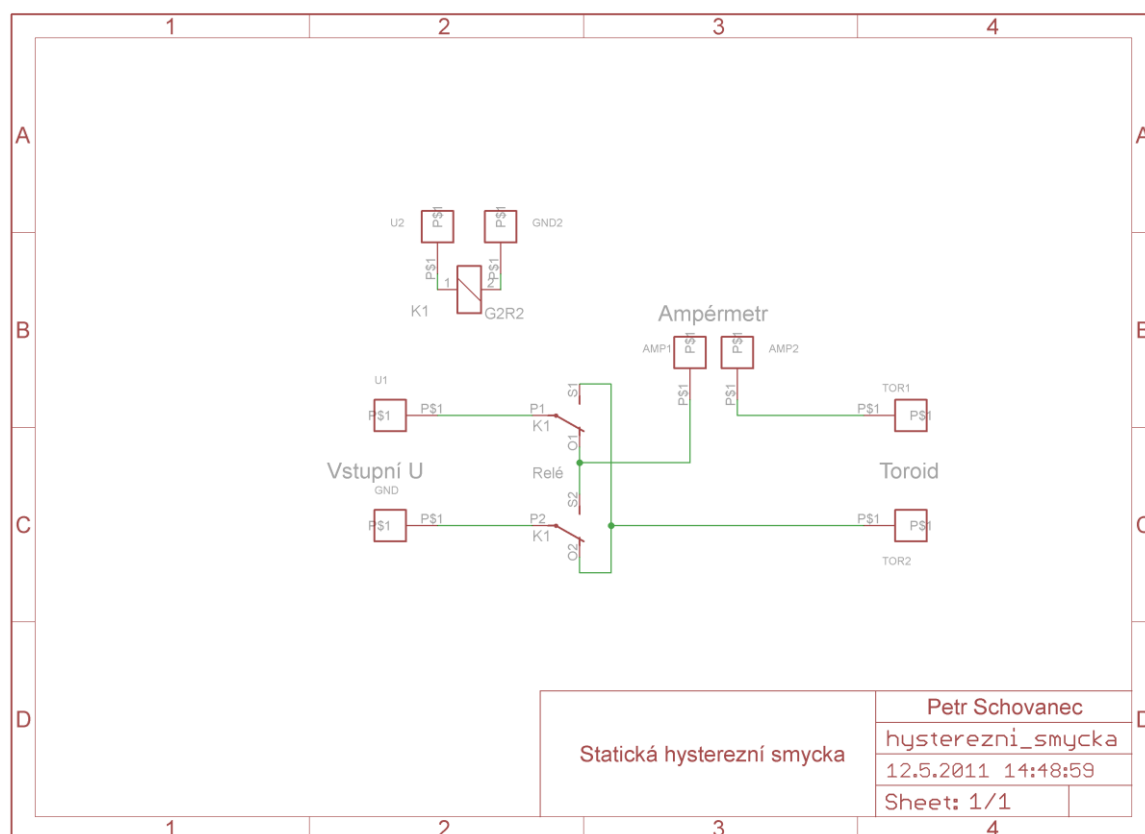


Obrázek 3.4: Měřený magnetický obvod

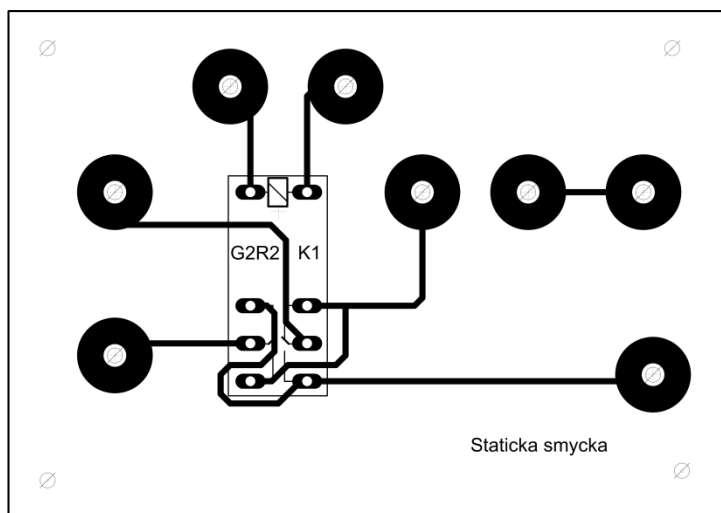
## 4 Realizace přípravku

### 4.1 Deska plošných spojů

Přípravek pro měření statické hysterezní smyčky jsem navrhnul tak, že pomocí banánků lze snadno připojit externí přístroje, kvůli snadné a rychlé přípravě i úklidu pracoviště. Externí přístroje jako je ampérmetr a toroid. Toroid může být zapojen vícekrát s jiným počtem závitů ( $6 \cdot 63$  závitů). Pomocí napětí na zdroji je ovládáno relé K1, které mění polaritu proudu, protékajícího toroidem. Tím bylo dosaženo zobrazení hysterezní smyčky. Schéma viz obrázek 4.1, zapojení desky plošných spojů se součástkami je na obrázku 4.2.



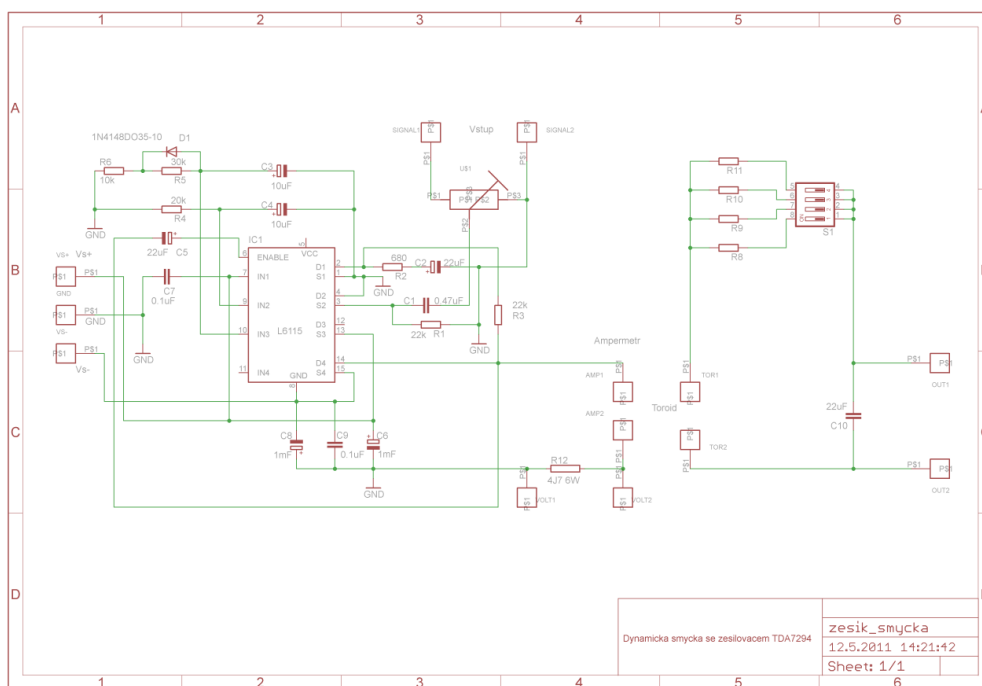
Obrázek 4.1: Schéma přípravku pro měření statické hysterezní smyčky.



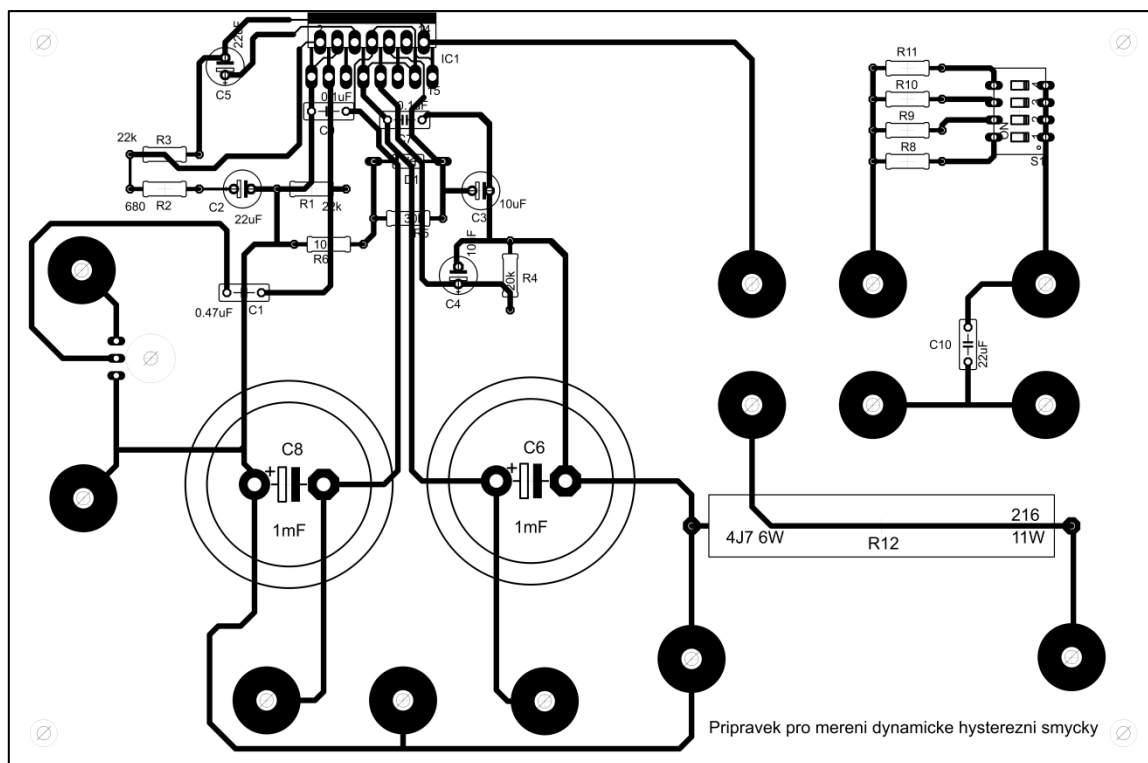
Obrázek 4.2: Zapojení na DPS se součástkami.

## 4.2 Zapojení se zesilovačem

U přípravku pro měření dynamické hysterezní smyčky jsem navrhnul na desku plošných spojů rovnou zabudovat i zesilovač TDA 7294, tím se opět zjednoduší příprava zapojení pracoviště. Na vstupu, kde je přiveden signál z generátoru funkcí jsem zařadil potenciometr na jemné doladění proudu, který protéká obvodem. Navíc na výstupu je možné měnit velikost integračního členu, pomocí přepínače S1, viz obrázek 4.5.



Obrázek 4.3: Schéma přípravku pro měření dynamické hysterezní smyčky se zesilovačem.



Obrázek 4.4: Zapojení DPS se součástkami a zesilovačem.

## 5 Zobrazení v počítačovém programu MATLAB

### 5.1 Automatizování měření

Pomocí počítačového programu MATLAB, GPIB a sériové komunikace (viz kapitoly 2.2 a 2.3) bylo měření zautomatizováno. Pomocí sériové komunikace RS232 byl připojen teslametr GM08 od firmy Hirst. GPIB komunikaci jsem použil pro připojení přístrojů od firmy Agilent (např. multimetr 34410A, generátor funkcí 33220A, stejnosměrný zdroj E3631A).

Nejdříve jsem v MATLABu, obohaceným o Instrumental Control Toolbox (viz kapitola 2.1.2), napsal program pro vytvoření a zahájení komunikace mezi přístroji a počítačem v M-file, kde je možné přístroje plně ovládat pomocí programovacího jazyku SCPI (viz kapitola 2.4). Rozhodl jsem se pro jednodušší verzi a použil jsem M-file pouze pro vytvoření spojení mezi počítačem a přístroji (viz obrázek 5.1). Následně komunikaci jsem realizoval pomocí dalšího rozšíření programu MATLAB v Simulinku (viz kapitola 2.1.4), kde bude měření srozumitelnější díky blokům v Simulinku (viz obrázek 5.4).

```
%Komunikace s multimetrem Agilent 34410A
mul = instrfind('Type','gpi','BoardIndex',7,'PrimaryAddress',22,'Tag','');
if isempty(mul)% testuje je-li pole prázdné, pokud ano, vrací 1, ne 0
    mul = gpi('AGILENT', 7, 22);
else
    fclose(mul);
    mul = mul(1)
end
fopen(mul);
%dotaz na identifikator zarizeni
fwrite(mul, '*IDN?'); %dotaz na identifikator zarizeni
IdentifikatorZarizeni = fscanf(mul);%nacteni zarizeni
disp(['multimeter 1: ' IdentifikatorZarizeni])%zobrazeni zarizeni
```

Obrázek 5.1: Část programu jazyka SCPI v MATLABu.

Na obrázku 5.2 je vidět struktura příkazu jazyka SCPI v programu MATLAB, kde posílám přístroji dotaz na aktuální hodnotu střídavého proudu.

```
fwrite(mul, 'MEAS:CURREN:AC? AUTO, MAX');
data_proud = fscanf(mul,'%f');
```

Obrázek 5.2: Část programu jazyka SCPI v MATLABu, načtení okamžité hodnoty proudu.

Ukázka plné ovladatelnosti přístrojů pomocí M-file je na obrázku 5.3 je vidět část programu, konkrétně cyklus „for“ pro odečtení 10ti hodnot z přístroje. Pro změnu počtu odečtených hodnot by nebylo zapotřebí velké korekce této části programu, ale na druhou stranu hledání správného řádku by určitě nějaký čas zabralo. I z tohoto důvodu jsem upřednostnil Simulink, kde jednoduše nastavíme dobu měření.

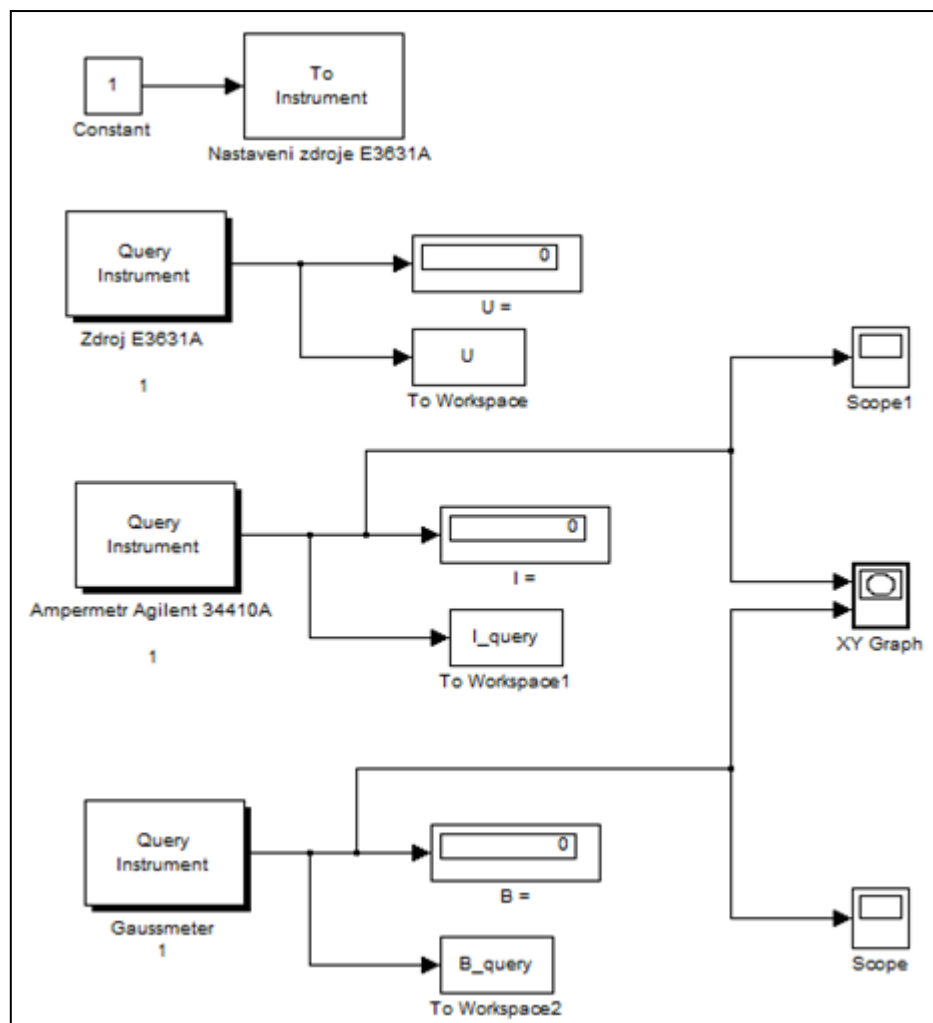
```
% definice promennych
B = zeros(1,11);
Range = zeros(1,11);

% Snimani dat z pristroje 10 hodnot
for i = 1:11
    fwrite(gausm, 'RetDisp');
    data_gausm = fscanf(gausm);
    upravena_data_gausm = sscanf(data_gausm,'%f');
    B(i) = upravena_data_gausm(1,1);
    Range(i) = upravena_data_gausm(2,1);
    i=i+1;
end
```

Obrázek 5.3: Ukázka části programu v MATLABu pro načtení 10ti hodnot.

Na obrázku 5.4 je vytvořeno blokové schéma v Simulinku. V prvním bloku „To Instrument“ nastavuji velikost napětí na stejnosměrném zdroji napětí HP E3631A, následně si tuto hodnotu kontroluji zpětným dotazem pomocí bloku „Query Instrument“, a zároveň tuto hodnotu ukládám do proměnné U. Slovo proměnná chápeme v programování jako „úložiště“ informace. Dále pomocí bloků „Query Instrument“ se tážu multimetru Agilent 34410A na velikost proudu, který ukládám do proměnné „I\_query“ a gaussmetru Hirst GM08 na velikost magnetické indukce, kterou rovněž ukládám do proměnné „B\_query“. Bloky „Scope“ a „Scope1“ mi vykreslují hodnoty proudu a magnetické indukce v závislosti na čas a blok „XY Graph“ vykresluje hodnotu magnetické indukce v závislosti na velikosti proudu, který odpovídá intenzitě magnetického pole.





Obrázek 5.4: Ukázka blokového schéma v Simulinku.

## 5.2 Porovnání teslametrů

Hlavním cílem projektu je zvýšení úrovně výuky předmětu Měřicí technika I a možnost rozšíření výuky do předmětů Základy měření, Číslicové měřicí systémy, Experimentální techniky a Měření a automatizace technologických procesů. Možnost rozšíření výuky se dále týká i ostatních fakult TUL a mezinárodního navazujícího magisterského programu "International master in Mechatronics".

Na rozvoj tohoto měření byl poskytnut vysokoškolský grant. Výběr měřicí techniky nebyl jednoduchý, neboť magnetickým měřením se nezabývá velmi mnoho firem. Renomované firmy (Agilent, Tektronix, ...) nabízejí vynikající kvalitu, avšak vyžadovalo

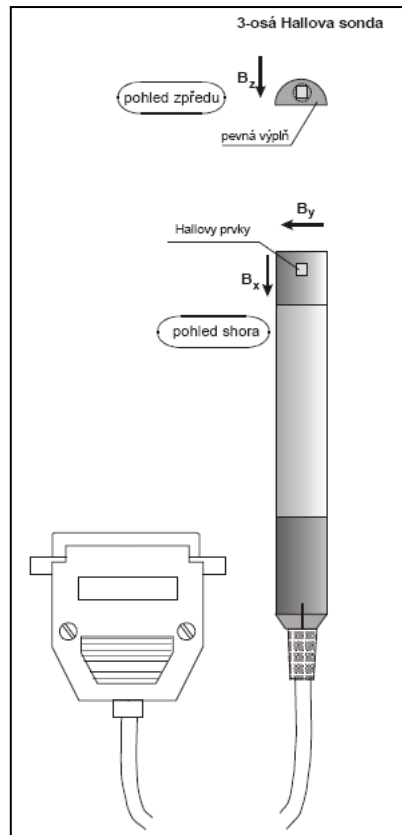
by to investiční náklady, pro které není tento grant určen. Byl tedy proveden kompromis, který zohlednil následující kritéria:

dostatečná přesnost přístrojů a její dlouhodobá stabilita, možnost vzdáleného odečtu dat, dostupný servis měřicích přístrojů, přijatelná cena.

Nakonec bylo na základě všech těchto kritérií vybráno 5× přístroj typu GM08 Gaussmeters od firmy Hirst Magnetic Instruments a 1× teslametr Elimag MP-1 od české firmy Elidis. Tento přístroj byl zakoupen kvůli možnosti zapojení 3-osé Hallovy sondy a měřit ve 3D (v osách x, y, z). Přehled a srovnání přístrojů pro měření magnetických polí (viz příloha D).



Obrázek 5.5: Zakoupené teslametry



Obrázek 5.6: 3D Hallova sonda.

Hallova sonda (viz obrázek 5.6) se používá pro měření magnetického pole a je založena na technickém využití Hallova jevu.

Princip Hallové sondy: sonda je tvořena úzkou polovodivou destičkou, skrz níž prochází proud a při vložení destičky do magnetického pole skrz ní prochází indukční tok a přeskupuje náboje v destičce na jednu stranu. Tak na Hallově sondě vzniká napětí. Hallovo napětí se dá vypočítat pomocí vzorce

$$U_h = k \cdot I \cdot B \quad (3.1)$$

kde  $k$  je konstanta (zahrnuje typ materiálu a tloušťku destičky),  $I$  je stejnosměrný proud a  $B$  je magnetická indukce způsobená magnetickým polem.

## 6 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout pracoviště praktických cvičení předmětu Měřicí technika I se zaměřením na měření magnetických polí, jako je například měření rozptylových polí transformátorů, měření hysterezní smyčky a dalších magnetických měření s možností zautomatizování těchto měření. Vzhledem k náročnosti zadání jsem se po dohodě s vedoucím práce omezil na měření hysterezních smyček, statických i dynamických a následné zautomatizování.

V úvodu práce je zmíněna teorie magnetického pole a její popis pomocí Maxwellových rovnic. Následně se práce zabývá popisem měření hysterezní smyčky a z důvodu zautomatizování celého měření i sběrnici GPIB a sériovou komunikací.

Vlastní návrh je potom rozdělen na dva přípravky v podobě osazeného plošného spoje, jeden pro měření statické hysterezní smyčky a druhý pro měření dynamické hysterezní smyčky. Pro měření byl navržen magnetický obvod, složený z feromagnetického jádra a dělené cívky, který byl poté vyroben firmou SVED.

U prvního přípravku je pomocí napěťového zdroje ovládáno relé, které mění směr toku proudu pro měření hysterezní smyčky ve všech kvadrantech. Ve druhém přípravku je zabudován i zesilovač TDA7294, který výkonově posílí sinusový signál z generátoru funkcí Agilent 33220A.

Součástí práce byl i výběr přístrojů pracovišť a pro standardní měření byl v specifikován přístroj GM08 anglické firmy Hirst Magnetics a pro přesná měření přístroj MP1 české firmy Elidis. Tyto přístroje byly pořízeny koncem roku 2010 a použity pro automatizaci měření.

Měření statické hysterezní křivky bylo pak automatizováno pomocí softwaru Matlab-Simulink. Byl vytvořen program pro řízení napěťového zdroje, pomocí něhož byla ovládána hodnota proudu do cívky přípravku, přepínání jeho polarity a sběr hodnot z teslametru GM08. Po problémech komunikace pomocí sběrnice USB byla nakonec využita sběrnice RS232.

## Seznam použité literatury

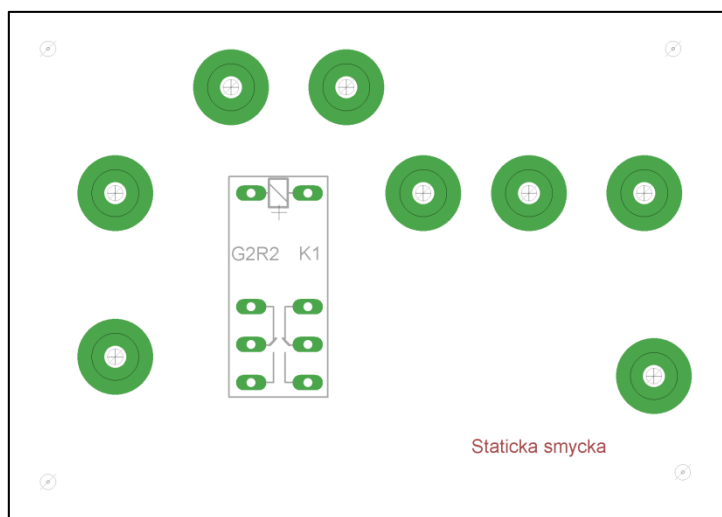
- [1] Permanentní magnety [online]. Magnety a teorie, Sinomag ve Světlé Hoře [citováno 20. 3. 2011].  
Dostupné z URL: <[www.sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni magnety.pdf](http://www.sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni%20magnety.pdf)>
- [2] Uhrová, H. a kol. Úloha č.17 Ferromagnetická hystereze [online]. Laboratorní cvičení z fyziky, VŠCHT v Praze [cit. 26. 3. 2011].  
Dostupné z URL:  
<[www.vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/uhrovah/skripta/Uloha%2017.pdf](http://www.vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/uhrovah/skripta/Uloha%2017.pdf)>
- [3] ČVUT Praha, Úloha č.37 Měření hysterezní křivky feromagnetických materiálů [online]. [cit. 29. 3. 2011].  
Dostupné z URL: <<http://euler.fd.cvut.cz/new/ctrl.php?act=show,file,865>>
- [4] ZČU v Plzni Měření magnetika [online]. [cit. 8. 4. 2011].  
URL: <<http://stag.zcu.cz/fel/ket/ETM/Cviceni/4.%20cviceni/Magnetika.pdf>>
- [5] Doc. Ing. Eva Konečná, CSc. Doc. Ing. Aleš Richter, CSc. Elektrické stroje [online]. Dostupné z URL: <[www.mti.tul.cz/files/ele/El\\_Str1\\_h.pdf](http://www.mti.tul.cz/files/ele/El_Str1_h.pdf)>
- [6] Systém nápovědy programu Matlab. Dostupné v programu Matlab.
- [7] Matlab podpora [online]. Dostupné z URL: <<http://www.humusoft.cz>>
- [8] National Instruments, GPIB komunikace [online]. Dostupné z URL:  
<<http://www.ni.com>>
- [9] Hardware server [online]. Dostupné z URL: <<http://hw.cz/rs-232>>
- [10] H2325-90001: Beginner's Guide to SCPI; Hewlett Packard Co., Palo Alto 1990
- [11] Agilent technologies, Programing Guide [online]. Dostupné z URL:  
<<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5962-0889.pdf>>

## **Přílohy**

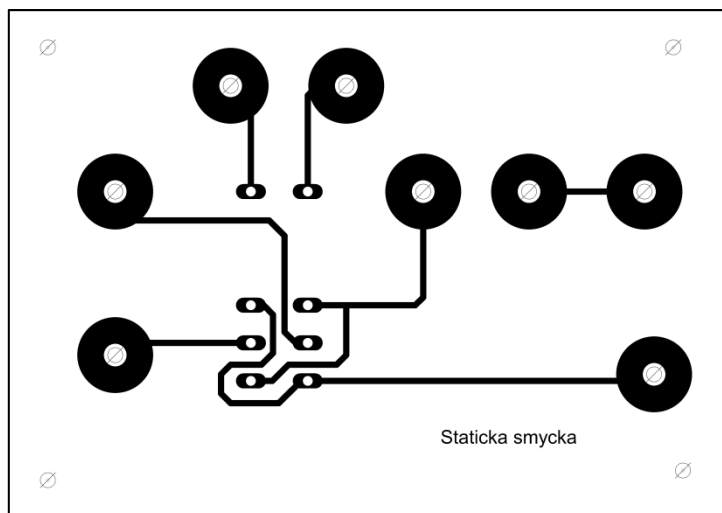
### **Seznam:**

A	Přípravek na měření statické hysterezní smyčky .....	47
B	Přípravek pro měření dynamické hysterezní smyčky .....	48
C	Seznam součástí .....	49
D	Porovnání magnetických přístrojů .....	50
E	M-file pro vytvoření a navázání komunikace s připojenými přístroji .....	51

## A Přípravek na měření statické hysterezní smyčky

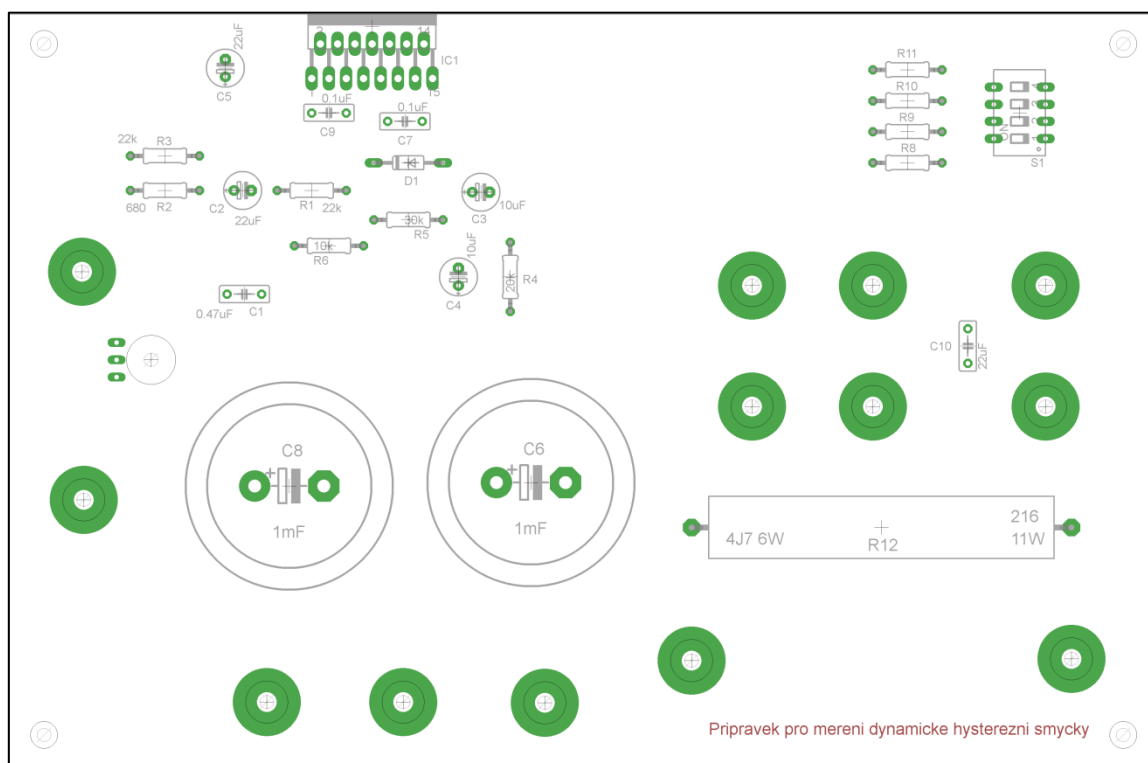


*Rozložení součástek na DPS.*

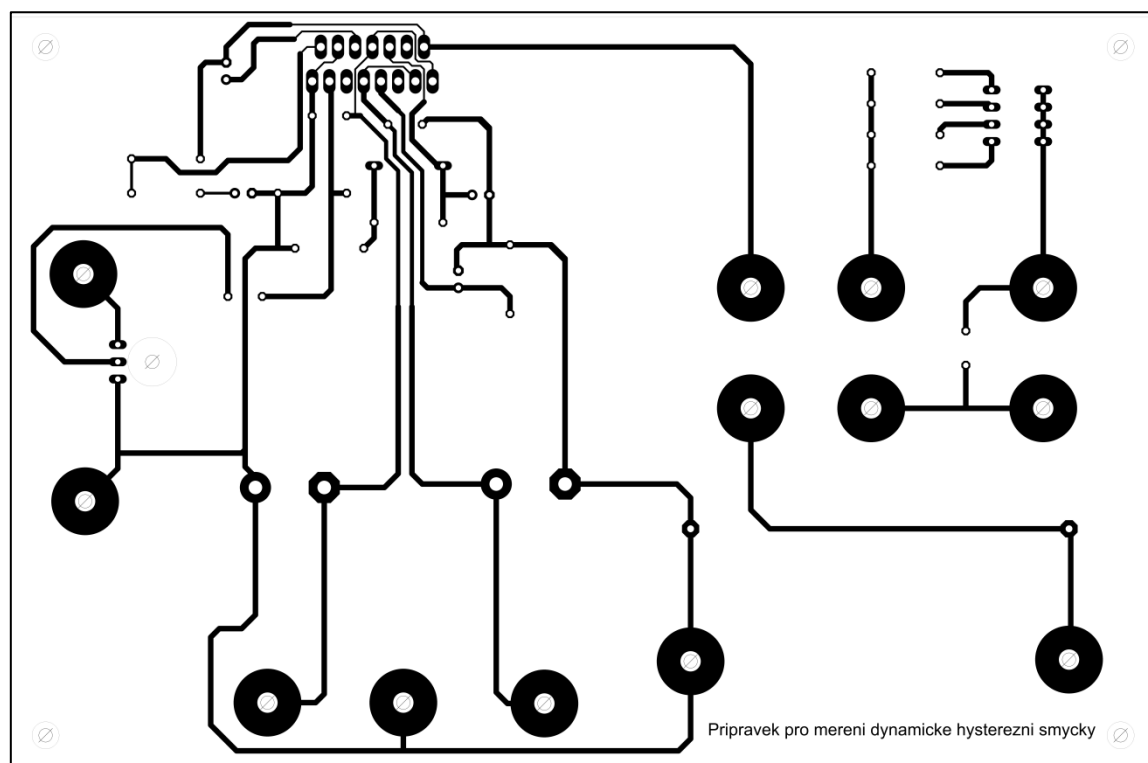


*Zapojení cest DPS.*

## B Přípravek pro měření dynamické hysterezní smyčky



*Rozložení součástek na DPS se zesilovačem.*



*Zapojení cest DPS se zesilovačem.*



## C Seznam součástek

### C1. Přípravek pro měření statické hysterezní smyčky.

Název	Hodnota	Pouzdro
8× banánky	zdičky pro banánky	zdičky pro banánky
K1	relé	G2R2

### C2. Přípravek pro měření dynamické hysterezní smyčky se zesilovačem TDA 7294.

Název	Hodnota	Pouzdro
C1	0,47uF	C050-025X075
C2	22uF	E2,5-6E
C3	10uF	E2,5-6E
C4	10uF	E2,5-6E
C5	22uF	E2,5-6E
C6	1mF	EB30D
C7	0,1uF	C050-025X075
C8	1mF	EB30D
C9	0,1uF	C050-025X075
C10	22uF	C050-025X075
R1	22k	0207/10
R2	680	0207/10
R3	22k	0207/10
R4	20k	0207/10
R5	30k	0207/10
R6	10k	0207/10
R8	1k	0207/10
R9	5k	0207/10
R10	10k	0207/10
R11	50k	0207/10
R12	4J7 6W	KH216-8
13× banánek	zdička pro banánky	zdička pro banánky
D1	1N4148DO35-10	DO35-10
potenciometr	B1K	B1K
S1	DIP04YL	DIP04YL
IC1	TDA 7294	MULTIWATT-15

## D Porovnání magnetických přístrojů

Porovnání magnetických přístrojů (teslametrů)				
odkaz	<a href="http://www.elidis.cz">www.elidis.cz</a>	<a href="http://www.hirst-magnetics.com">www.hirst-magnetics.com</a>	<a href="http://www.defektoskopie.cz">www.defektoskopie.cz</a>	<a href="http://www.lakeshore.com">www.lakeshore.com</a>
typ přístroje	ELIDIS MP1	HIRST GMO8	BELL 5170 / 5180	Model 410 Gaussmeter
rozsahy	10mT – 2T	2mT – 3T	20mT – 2T / 30mT – 3T	20mT – 2T
citlivost	100 uT	1 uT	–	–
frekvence	–	DC, 15Hz – 10kHz	0 – 20 kHz / 0 – 40 kHz	DC, 20 Hz – 10 kHz
režimy	peak, hold, average, base	DC, DC peak, AC, AC peak, AC max	DC	AC / DC
přesnost	1% z rozsahu	lepší než 1% z rozsahu	2% / 1%	DC 2%, AC 5% z čtení
teplotní drift	0,02 mT/K	0,1% of rdg/K	–	0.05% rdg/°C
komunikace	RS232 / modbus, adam	RS232, USB	ne / USB	ne
analog	0 – 1V	±3V	ne / ±3V	ne
údaje na displeji	3 směry současně	1 směr	1 směr	1 směr
doba provozu	20hod	4x AA baterie 1,5V	4x AA baterie 1,5V	160 hodin
příslušenství	kufřík, zdroj	sonda TP002, komora, kufřík	kufřík, tang. sonda, nulovací komůrka, baterie	sonda, baterie
sondy	3 hallovy a 1 feromag.	TP002 (přísl.), AP002	axiální sonda	axiální, transverzální
cena	29000,– Kč + cena sondy	650 liber (18900,– Kč)	22900,– Kč / 39600,– Kč	25000,– Kč
kontakt	<a href="mailto:info@elidis.cz">info@elidis.cz</a>	<a href="mailto:enquiry@hirst-magnetics.com">enquiry@hirst-magnetics.com</a>	<a href="mailto:info@defektoskopie.cz">info@defektoskopie.cz</a>	<a href="mailto:prague@teco-rene-koch.com">prague@teco-rene-koch.com</a>

## E M-file pro vytvoření a navázání komunikace s připojenými přístroji

```
%Zdroj Agilent E3631A
zdroj = instrfind('Type','gpib','BoardIndex',7,'PrimaryAddress',5,'Tag','');

if isempty(zdroj) % testuje je-li pole prázdné, pokud ano, vrací 1, ne 0
    zdroj = gpib('AGILENT', 7, 5);
else
    fclose(zdroj);
    zdroj = zdroj(1)
end
% pripojeni pristroje
fopen(zdroj);

% Komunikace s teslametrem Hirst GM08.
% Vytvoreni objektu na seriovem portu COM3.
gausm = instrfind('Type','serial','Port','COM3','Tag','');

if isempty(gausm) % testuje je-li pole prázdné, pokud ano, vrací 1, ne 0
    gausm = serial('COM3');
else
    fclose(gausm);
    gausm = gausm(1)
end
%nastaveni parametru
set(gausm,'BaudRate',9600,'Parity','none','DataBits',8,'StopBits',1);
% pripojeni pristroje
fopen(gausm);

% Vytvoreni Generatoru funkci.
genfun = instrfind('Type','gpib','BoardIndex',7,'PrimaryAddress',11,'Tag','');
% Vytvoreni GPIB objectu, pokud neexistuje, jinak pouzit existujici

if isempty(genfun)% testuje je-li pole prázdné, pokud ano, vrací 1, ne 0
    genfun = gpib('AGILENT', 7, 11);
else
    fclose(genfun);
    genfun = genfun(1)
end
% pripojeni pristroje
fopen(genfun);

%Komunikace s multimetrem Agilent 34410A
mul = instrfind('Type','gpib','BoardIndex',7,'PrimaryAddress',22,'Tag','');

if isempty(mul)% testuje je-li pole prázdné, pokud ano, vrací 1, ne 0
    mul = gpib('AGILENT', 7, 22);
else
    fclose(mul);
    mul = mul(1)
end

fopen(mul);
```